

Jere Oksanen

# **GEOENERGIAN PÄÄSTÖVÄHENNYS- POTENTIAALI SUOMESSA**

Tuntikohtainen tarkastelu suurkohteissa

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Diplomityö  
Maaliskuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Jere Oksanen: Geoenergian päästövähennyspotentiali Suomessa, tuntikohtainen tarkastelu suurkohteissa  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma  
Maaliskuu 2020

---

Tässä diplomityössä kehitettiin Excel-taulukkolaskentapohja geoenergiajärjestelmien käyttämän sähköenergian todellisten päästöjen laskentaa varten. Työ suoritettiin Rototec Oy:lle, joka on osa Rototec Groupia. Rototec Group on Euroopan suurin energiakaivojen porausyritys. Työn tavoite oli laskea tieteellisesti perusteltu geoenergian päästökerroin ja määrittää siten geoenergian potentiaali vastaamaan kiristuviin energiatehokkuus- ja kasvihuonekaasujen päästövaatimuksiin. Tutkimuksen yhteydessä tarkasteltiin geoenergian päästövähennyksien kustannustehokkuutta, sekä geoenergiajärjestelmien yleistymisen vaikutusta tulevaisuuden energiaverkostoihin.

Laskenta perustuu Suomen sähköntuotannon ja tuontisähkön tuntikohtaisen päästökertoimen määrittämiseen, sekä tarkasteltujen suurkohteiden tuntikohtaiseen lämpöenergiankulutukseen. Tuntikohtaisen energiankulutuksen ja lämpöpumpun hyötysuhteen avulla laskettiin käytetyn sähköenergian määrä ja sen tuotannosta aiheutuneet hiilidioksidipäästöt. Laskentapohjan avulla voidaan tarkastella eri kohteiden energiankulutusprofiilien, lämpöpumpun hyötysuhteen, sekä osatehomitoituksen vaikutuksia järjestelmän päästöihin, investointiin ja energiakustannuksiin. Laskentapohja rakennettiin hyödyntämään tiedonsyöttöväylilehden taustalle kehitettyä virallisiin tilastoihin perustuvaa datakirjastoa. Siten tarkasteltavan kohteen energioiden hinnat ja päästökertoimet voidaan hakea valikoista kuluttajaluokan ja tarkasteluvuoden mukaan automaattisesti jokaiselle vuoden tunnille. Kaikki ominaisuudet ovat myös syötettävissä manuaalisesti tarkempien tarkastelujen mahdollistamiseksi.

Laskennan tuloksia sekä vaadittavan investoinnin kannattavuutta vertailtiin kilpaileviin kasvihuonekaasupäästöjä tuottaviin lämmitysmuotoihin tarkastelukohteissa. Tutkimuksessa käytettyjen keskiarvotuksien ja järjestelmäoletuksien perusteella geoenergia on tarkastelluista lämmitysmuodoista selvästi vähäpäästöisin. Päästövähennyspotentiali on merkittävä, etenkin kun huomioidaan erillislämmityksen kuuluvan kansalliseen taakanjakosektoriin. Sähköntuotannon päästöt vähenevät sähköntuotannon puhdistumisen myötä tulevaisuudessa entisestään. Järjestelmän pienet energiakustannukset tekevät siitä taloudellisesti hyvin kannattavan sopivalla osatehomitoituksella. Taloudellinen kannattavuus vaihtelee kohteiden kulutusprofiilien ja kallioperän lämpöominaisuuksien mukaan.

Hyvän hyötysuhteen ansiosta geoenergian taloudellinen kannattavuus pysyy tasaisena sähkönn hinnan tai korkojen noususta riippumatta. Samasta syystä maalämpöpumpuilla on kapasiteettiinsa nähden pienin vaikutus vaaditun sähköteon lisääntymiseen, kun öljylämmitystä ja kaukolämpöä korvataan energiasaneerauksilla. Järjestelmän huipputehon kasvattaminen lisää investointikustannuksia merkittävästi, vaikka vaikutus geoenergian ominaispäästökertoimeen on hyvin pieni. Geoenergiajärjestelmien yleistymisen ja osatehoisuuden aiheuttamia suuria tehopiikkejä voidaan pehmentää kysyntäjoustolla ja suuremmalla varaajakapasiteetilla.

Avainsanat: Geoenergia, maalämpöpumppu, hyötysuhde, ominaispäästökerroin

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Jere Oksanen: Emissions Reduction Potential of Geoenergy Systems in Finland  
Master's thesis  
Tampere University  
Mechanical Engineering  
March 2020

---

In this thesis an Excel based calculation tool was created to solve the actual carbon dioxide emissions of geoenergy systems in Finland. The thesis was completed for Rototec Oy, which is part of Rototec Group. Rototec Group is the largest energy borehole drilling company in Europe. The aim of this study was to calculate the carbon intensity of the heat energy produced with geoenergy systems in Finland. The reason behind this study was to solve the full potential of emission reduction in relation to the national and European Union's greenhouse gas emissions targets. The cost efficiency of geoenergy investments emissions reductions was also assessed. The calculation results were compared with oil, natural gas, direct electricity and district heating systems.

The calculation was based on the hourly production and import data of the Finnish electricity grid. The data includes all the energy sources used to meet the hourly demand. The carbon intensity data was then paired with the hourly heating demand of larger apartment building and a service building. With the energy demand data and using the ground source heat pump efficiency coefficient, the electricity consumption of the system could be calculated accurately. Emissions were then calculated by comparing hourly electricity consumption and the carbon intensity of the electricity. The effects of peak heating power coverage, heat pump efficiency and the energy consumption profile were then studied further. The aforementioned inputs effect the heating carbon intensity, investment costs and energy price in various manners to different degrees. The calculation tool was created to be easily modified. The user interface sheet was built on a library of gathered official data and changing calculation input parameters could be done through multiple click down menus or they could be manually overwritten.

Geoenergy systems are more complicated than conventional heating systems, and the study inputs need to be changed case by case. Based on the average bedrock thermal properties and other assumptions made in the calculation, geoenergy is less carbon intensive than all other greenhouse gas producing heat systems by a large margin. The full potential is significant, especially considering that fossil fuel heating systems are included in the national effort sharing sector, where as the electricity used by the heat pump is in the EU emissions trading sector. The investment costs and economic profitability was also assessed to determine the cost efficiency. The very low energy price of geoenergy makes it a very suitable energy source for the studied cases. Further analysis suggested that increasing peak heating power coverage towards a 100% is not a cost-effective way to decrease carbon emissions because of the increase in investment costs. However, the system profitability varies greatly between different bed rock thermal properties and energy demand profiles.

Sensitivity analysis was also conducted. The energy carbon intensity is decreasing further in the future as electricity becomes more carbon neutral. The economic profitability is not sensitive to increases in electricity price or investment loan interest because of the high efficiency of the system. The efficiency is also the reason ground source heat pumps have the least negative peak power effects on the electricity grid when fossil fuels and district heating is replaced with geoenergy systems. The effects can be further decreased if demand response is implemented through smart control systems and the water heater storage capacity is increased.

Keywords: Geoenergy, ground source heat pump, efficiency, carbon intensity

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

# ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Rototec Oy:lle ja aihe valitui yrityksen tarpeen ja oman mielenkiinnon mukaan osa-aikaisen työsuhteen aikana. Työn ohjaajana on toiminut yliopiston lehtori Henrik Tolvanen ja toisena tarkastajana on toiminut yliopiston lehtori Seppo Syrjälä. Rototec Oy:n puolelta ohjaajana on toiminut tietohallintojohtaja Tomi Mäkiäho.

Haluan kiittää diplomityön aikaisesta yhteistyöstä ja joustosta Rototec Oy:n Pirkkalan toimiston työntekijöitä ja ohjaajaa Tomi Mäkiähoa. Kiitokset myös Henrik Tolvaselle hyvästä ohjauksesta ja hyvin sujuneesta yhteistyöstä, sekä Seppo Syrjälälle työn tarkastamisesta.

Tampereella 2.3.2020

Jere Oksanen

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. GEOENERGIAN YLEISTILANNE .....	4
2.1 Markkinaympäristö .....	7
2.1.1 Sähköenergia .....	9
2.1.2 Lämpöenergia .....	11
2.2 Geoenergian rooli Suomessa .....	14
3. GEOENERGIAJÄRJESTELMÄN TOIMINTA .....	18
3.1 Järjestelmän kuvaus .....	18
3.1.1 Energiakaivokenttä .....	23
3.2 Kulutuskohteet .....	26
3.3 Geoenergian mahdollisuudet ja haasteet .....	28
4. TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO .....	31
4.1 Tutkimusvaiheet .....	31
4.1.1 Sähköverkkotutkimus .....	32
4.1.2 Kaukolämpö ja polttoainetutkimus .....	34
4.2 Laskentatyökalun ominaisuudet ja oletukset .....	36
4.2.1 Energia ja päästöt .....	36
4.2.2 Kustannukset .....	37
4.3 Tarkastelukohteiden kuvaus .....	39
4.3.1 Teollisuushalli .....	41
4.3.2 Asuinkerrostalot .....	42
5. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU .....	45
5.1 Päästötarkastelu .....	45
5.1.1 Päästötarkastelu CASE 1-3 .....	45
5.1.2 Päästötarkastelu CASE 4-6 .....	47
5.1.3 Päästötarkastelu CASE 7-9 .....	48
5.2 Vertailu muihin lämmitysmuotoihin .....	49
5.2.1 Päästövertailu .....	49
5.2.2 Kustannusvertailu .....	51
5.3 Herkkyystarkastelu .....	54
5.4 Pohdinta .....	56
6. YHTEENVETO .....	58
LÄHTEET .....	60

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

MLP	Maalämpöpumppu
EU	Euroopan Unioni
CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi
MtCO <sub>2</sub> -ekv	miljoonaa hiilidioksidiekvivalentti tonnia
g/kWh	hiilidioksidigrammaa per kilowattitunti energiaa

# 1. JOHDANTO

Väestönkasvu, energian kulutus ja kulutushyödykkeiden käyttö ovat kasvaneet eksponentiaalisesti globaalilla tasolla. Elintason kasvu on verrannollinen energiankulutukseen. Energia on tuotettu edullisen hinnan ja saatavuuden takia fossiilisia polttoaineita käyttämällä. Tietoisuus tilanteen kestättömyydestä, sekä havaitut muutokset ilmastossa globaalilla tasolla ovat ajaneet kehittyneitä valtioita ilmastomuutoksen hidastamiseen ja rajallisten resurssien tehokkaampaan ja kestävämpään hyödyntämiseen. [1]

Suomi on osana Euroopan Unionia osaltaan vastuussa EU:n asettamien päästötavoitteiden saavuttamisessa. Tavoitteet ovat kokonaispäästövähennyksissä, energiatehokkuudessa ja uusiutuvien energialähteiden käytön lisäämisessä. Suurimpia energiankuluttajia ja kasvihuonekaasupäästöjä aiheuttavia yhteiskuntasektoreita Suomessa ovat teollisuus, rakennusten lämmitys ja liikenne. [2]

Geoenergialla tarkoitetaan maaperästä saatavaa lämpöenergiaa, jota hyödynnetään maalämpöpumpulla. Ensimmäiset maalämpöpumput asennettiin Suomessa 1976. Maalämpöpumppu on ollut jatkuvassa kasvussa päälämmityslähteenä omakotitaloissa vuodesta 2004 lähtien. Uusilla asuinalueilla jopa 50-80% pientaloista valitsee geoenergian. Se sopii erinomaisesti korvaamaan sähkölämmityksen uudiskohteissa ja öljylämmityksen saneerauskohteissa edullisen energiakustannuksen takia. Suomessa on monia maalämpöpumppuvalmistajia. Maalämpöpumpun kotimaisuusaste on noin 70%, mikä on selvästi suurempi kuin muiden lämpöpumppujen. Suuritehoiset lämpöpumput ovat kasvattaneet myyntiään viime vuosina moninkertaisesti, kun kalliolämpö on yleistynyt ja suuret kohteet ovat siirtyneet enemmän geoenergiaan. Geoenergia on paikallista, uusiutuvaa ja sen etuna on alhainen energiakustannus ja huoltovapaus, sekä mahdollisuus edulliseen viilennykseen. Geoenergialla on kuitenkin korkea investointikustannus. Geoenergia on lämmitysratkaisuna usein isommissa, korkeamman energiantarpeen kohteissa. Ääritapauksessa energiakustannukset voivat pudota 70% öljylämmitteisen kiinteistön lämmitysmuodon vaihtamisessa geoenergiaan. [3] [4] [5] [6] [7]

Tässä työssä tutkitaan geoenergiajärjestelmien vaikutuksia asuin- ja palvelukiinteistöjen lämmityksen todellisissa päästövähennyksissä. Geoenergialla tarkoitetaan kallioperään sitoutunutta lämpöä, joka on peräisin syvältä maapallon kuumista ja sulista kerroksista. Geoenergiaa hyödynnetään energiakaivoilla, jotka ovat yleensä 100-300 metriä syviä.

Näissä syvyyksissä lämpötila on tavallisesti 7-10°C. Lämpöä hyödynnetään maalämpöpumpun avulla. Geotermiset voimalaitokset taas hyödyntävät mannerlaattojen reunama-alueiden lähelle maan pintaa nousevaa sulaa kiveä. Niissä lämpötilat ovat satoja celsiusasteita ja vedestä tehdään höyryä kilometrien syvyisissä kaivoissa. Tuotetulla höyryllä pyöritetään turbiinia aivan kuin tavallisissa lämpövoimalaitoksissa. Suomessa ei ole geotermisiä voimalaitoksia.

Tarkastelukohteiksi valittiin asuinkerrostalot ja kaupalliset tai julkiset suurkohteet. Päästövähennyksen potentiaalia tarkastellaan osana EU:n asettamien ilmasto- ja energiataivoitteiden 2030 ja 2050 saavuttamista. Potentiaalia tarkastellaan primäärienergian kokonaiskulutukseen ja vaadittaviin kansallisiin kokonaispäästövähennyksiin suhteutettuna.

Työn tavoitteena on selvittää geoenergian mahdollisuuksia ja markkinatilannetta Suomessa vallitsevissa ilmasto-olosuhteissa ja energiainfrastruktuurissa, sekä luoda selkeyttä geoenergiajärjestelmän toiminnasta suurkohteissa.

Työssä pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Miten geoenergiajärjestelmän päästöt eroavat markkinoiden muista lämmitysmuodoista?
- Mitkä ovat geoenergiajärjestelmän todelliset päästöt eri tarkastelukohteissa?
- Mikä on geoenergiajärjestelmän investointi- ja käyttökustannus tarkastelukoh-teissa?
- Mikä on geoenergiajärjestelmän optimimitoitus päästöjä ja kustannuksia tarkastellen?

Järjestelmän päästöjen selvittämiseksi tutkittiin Suomen sähköntuotannon, sekä sähkön nettotuonnin tuntikohtaista dataa. Dataa arviottiin virallisten laskentaohjeiden mukaisesti ja verrattiin julkisiin laskentoihin. Tuntikohtaisella sähköverkon päästökertoimella voitiin laskea tarkastelukohteiden lämmitysenergian kulutusdatasta todelliset päästöt. Laskennassa selvitetään tarkastelukohteiden päästöjen lisäksi lämmityssähkön ominaispäästökerroin tarkasteluvuosittain. Päästökauppaa ja sen kehitystä tarkasteltiin lyhyesti.

Tuloksien laskentaa varten kehitettiin Excel-taulukkolaskentapohja, jonka avulla rakennuksen tuntikohtaisesta energiankulutusdatasta ja sähköverkon tuntikohtaisesta päästökertoimesta verrataan päästöjä muihin lämmitysmenetelmiin. Eri lämmitysmuotojen energiakustannuksia ja niiden hintakehitystä tarkasteltiin lyhyesti. Maalämpöjärjestelmän tuotantovaiheen päästöjä ja energiankulutusta, sekä käytön vaikutuksia sähköverkon kuormitukseen tarkasteltiin käyttökohteen ulkopuolisten vaikutusten selvittämiseksi.



Luvussa 2 perehdytään geoenergian markkinaympäristöön ja Suomen kasvihuonekaasu päästöihin, sekä vaadittuihin päästövähennyksiin. Tarkastelu tehdään lämmityssektorin osalta. Luvussa 3 syvennyttään geoenergiajärjestelmän toimintaperiaatteisiin ja sen eroavaisuuksiin, mahdollisuuksiin ja haasteisiin perinteisiin lämmitysjärjestelmiin verrattuna. Luvun 3 tarkoitus on luoda tarkempi kuva tutkimuskysymyksien taustoista. Luvussa 4 selvitetään tutkimusmenetelmät ja aineisto, jonka pohjalta tämä diplomityö on tehty. Tarkoituksena on perustella datan ja oletuksien oikeellisuus ja selittää niiden vaikutuksia. Samalla selvitetään laskentapohjaan lisätyt ominaisuudet ja rajoitteet, sekä niiden taustatekijät ja syyt. Luvussa 4 esitetään myös tutkimus CASE:t ja tarkastellaan syötettyjen tekijöiden oletettuja vaikutuksia. Luvussa 5 esitetään jokaisen tutkimus CASE:n päästölaskennan tulokset ja optimimitoitettujen investointien kannattavuuslaskelma. Päästökertoimia verrataan muihin lämmitysmuotoihin. Tuloksille esitetään herkkyysanalyysiä ja kokonaispäästövähennyksien potentiaalia, sekä muita vaikutuksia pohditaan kriittisesti. Päästölaskennan tuloksia myös verrataan virallisissa tilastoissa ja kirjallisuudessa esitettyihin lukuihin.

## 2. GEOENERGIAN YLEISTILANNE

Tässä luvussa tarkastellaan Suomen lämmityssektoria osana kokonaisenergiamarkkinoita ja arvioidaan millainen markkinaosuus ja yleistilanne geoenergialla on Suomessa. Yleisesti käsitellään päästöjä ja niiden vähennystavoitteita ja velvoitteita, mihin Suomi on kansainvälisesti sitoutunut. Lämmön- ja sähköntuotannon energiatietoja ja päästöjä tarkastellaan tarkemmin osana kokonaispäästöjä. Samalla selvitetään niiden vaikutuksia päästötavoitteisiin.

Suomi on sitoutunut Kioton pöytäkirjan toisen velvotekauden mukaisiin EU:n tavoitteisiin vähentää KHK-päästöjä 20% vuoden 1990 tasosta, nostamaan uusiutuvan energian osuuden 20%:iin ja parantamaan energiatehokkuutta 20% vuonna 2007 arvioituun kehityssuuntaan, vuoteen 2020 mennessä. [8] Euroopan neuvoston pitkän tähtäimen tavoite on 80-95%:n päästövähennys vuoden 1990 tasosta vuoteen 2050 mennessä. Tavoite on linjassa kansainvälisten ilmastositoumusten kanssa ja pyrkii rajoittamaan maapallon keskilämpötilan nousemisen kahteen celsius-asteeseen. Suomen kansallinen tavoite oli uusiutuvan energian osuus 38% loppukulutuksesta, ja se saavutettiin jo vuonna 2014. EU:n ilmastostrategian vuoden 2030 päästötavoite on 40%:n kokonaispäästöjen vähennys vuodesta 1990. Kokonaispäästö jaetaan EU:n päästökaupparektoriin (EU ETS) ja taakanjakosektoriin.

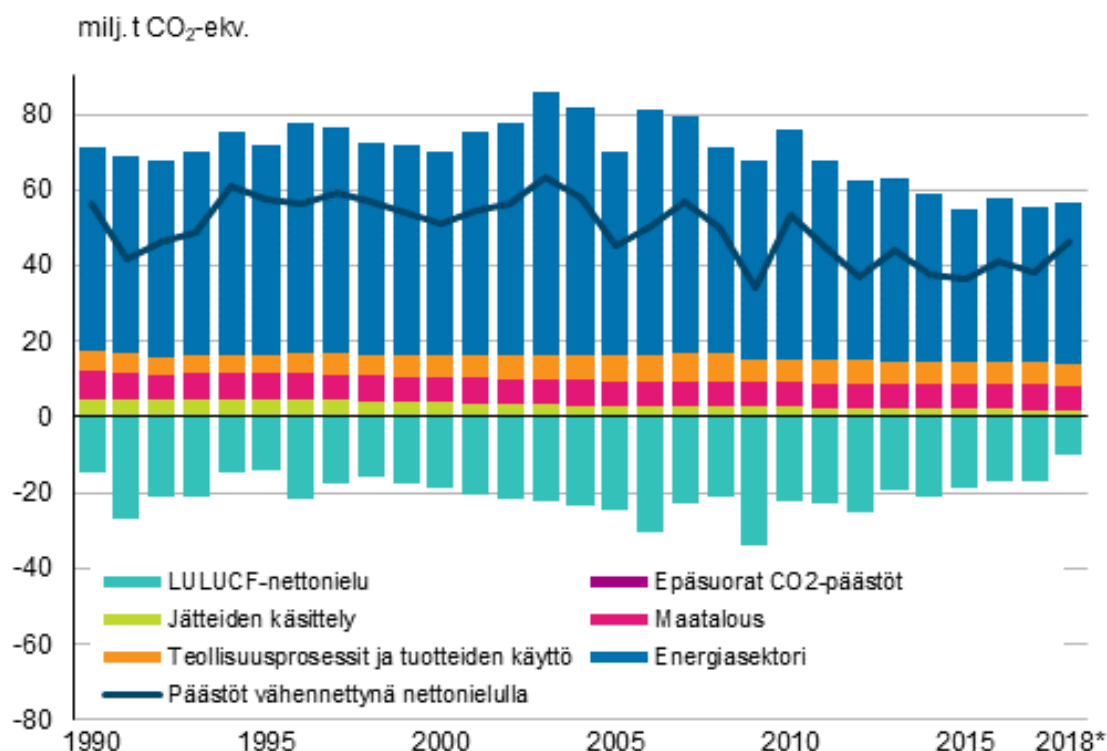
Päästökaupparektoriin kuuluu voimalaitokset ja raskasteollisuus, joille jaetaan rajattu päästöoikeus. Päästöoikeuksia vähennetään vuosittain tavoitteen mukaisesti, mikä ohjaa markkinoita vähäpäästöisempään toimintaan. Yrityksille jää sakon uhalla vaihtoehtoisiksi vähentää päästöjään tai ostaa oikeuksia niiltä yrityksiltä, jotka alittavat kiintiönsä, mikä edelleen edesauttaa hiilineutraalin energian ja teollisuuden taloudellista kilpailukykyä. Kiintiön alitukset voi säästää seuraaviin vuosiin. Päästökaupparektorin kokonaistavoite on vähentää päästöjä 43% vuoden 2005 tasosta vuoteen 2030 mennessä. Taakanjakosektoriin kuuluu kaikki päästökaupan ulkopuolinen toiminta. Taakanjakosektorille on johdettu maakohtaiset tavoitteet ja päästökiintiöt. Jäsenmaat vastaavat itsenäisesti niiden saavuttamisesta. Suomelle määrätty taakanjakosektorin osuus on 16%:n ja 39%:n vähennys vuoden 2005 tasosta, vuosiin 2020 ja 2030 mennessä. Lentämisen päästöt ovat erikseen, ja EU:n sisäiset lennot kuuluvat omaan lentopäästökaupparejärjestelmäänsä. [9]

Suomessa merkittävää metsänielua ei voi käyttää suoraan hiilidioksidipoistumana, vaan sillä voidaan kompensoida taakanjakosektorin päästötavoitteiden mahdolliset ylitykset.

Maankäyttö ja metsänieluille (LULUCF, Land Use, Land Use Change, Forestry) on asetettu 2000-2009 arvioitu vertailutaso, joka on suomella -36,79 MtCO<sub>2</sub>-ekv (miljoonaa hiilidioksidiekvivalenttitonnia). Tämän ylittävistä nettonielusta Suomi voi saada enintään 2,5 MtCO<sub>2</sub>-ekv laskennallista hyötyä vuosittain. Vertailutasoa pienempään nettonieluun Suomella on metsäjoustoa yhteensä 2021-2030 enintään -44 MtCO<sub>2</sub>-ekv. [10] LULUCF-asetuksella ohjataan vastuullisempaan maan ja metsänkäyttöön ja nielujen lisäämiseen. Asetuksen vaikutuksista kokonaispäästötavoitteisiin on kritisoitu niiden maiden toimesta, missä metsää on erityisen paljon, sillä nielut haluttaisiin helpottamaan tavoitteisiin pääsyä osana kokonaispäästölaskentaa.

Joulukuussa 2019 Euroopan komissio on ilmoittanut Eurooppalaisesta Green Deal -hankkeesta, jonka tavoitteina on ottaa koko yhteiskunta mukaan päästötavoitteisiin. Euroopan talous ja kehitys pyritään integroimaan vuoden 2050 hiilineutraalius-tavoitteeseen. Tavoitteet ovat Pariisin ilmastopöytäkirjan mukaiset. Green Deal -hanke sisältää kymmeniä toimia seuraavien kahden vuoden ajalle, joista yksi on vuoden 2030 kokonaispäästötavoitteiden kiristäminen 50-55%:iin. [11] Tavoitteiden jako sektoreittain selviää vuoden 2020 aikana, mutta myös Suomen tavoitteiden voidaan olettaa nousevan. Tulevista hankkeista tärkeimpänä tämän työn kannalta on mahdollinen päästökauppa-sektorin kiristys ja laajentaminen energiasektorin ulkopuoliseen lämmitykseen, rakentamiseen ja liikenteeseen, sekä mahdollinen hiilitulli tuontituotteille.

Suomen kokonaispäästöt pl. LULUCF olivat vuonna 2018 pikaennakon mukaan 56,5 MtCO<sub>2</sub>-ekv, mikä on noin 21% vähennys vuoden 1990 vertailutasosta, joka oli 70 MtCO<sub>2</sub>-ekv. Kuvassa 1 on esitetty Suomen päästökehitys sektoreittain. [2]



**Kuva 1. Suomen kasvihuonekaasupäästöt ja -poistumat sektoreittain. (SVT, Kasvihuonekaasut)**

Energiasektori tuottaa noin 75% päästöistä, ja sisältää sähkön- ja lämmöntuotantolaitokset, teollisuuden ja rakentamisen, kotimaan liikenteen, rakennusten lämmityksen, maa-, metsä- ja kalatalouden sekä työkoneet, haihtumapäästöt ja muun polttoainekäytön. Energiasektorista raskasteollisuus ja yli 20 MW energiantuotantolaitokset kuuluvat EU:n päästökauppasektoriin. Kaukolämmityksen päästöt olivat 5,5 MtCO<sub>2</sub>-ekv. Taakanjakosektorin osuus päästöistä oli 30,0 MtCO<sub>2</sub>-ekv. Vertailutaso vuodelta 2005 oli 34 MtCO<sub>2</sub>-ekv. Suomi saavuttaa 2020 tavoitteensa käyttämällä joustokeinoja, ja 2030 tavoite on merkittävästi tiukempi jo ennen tavoitteiden kiristämistä Green Deal -hankkeen mukaan. Tarvitaan siis lisää toimia tavoitteiden saavuttamiseksi.

Suomessa taakanjakosektorin päästöt syntyvät suurimmaksi osaksi liikenteestä, rakennusten lämmityksestä, F-kaasujen käytöstä, maataloudesta ja jätehuollosta. [2] Taulukosta 1 nähdään Suomen kasvihuonepäästöt sektoreittain. Erillislämmityksen päästöt olivat noin 3 MtCO<sub>2</sub>-ekv, eli 10% taakanjakosektorin kokonaispäästöistä vuonna 2017. Tämän hetkisten tavoitteiden mukaan taakanjakosektorin päästöt vuonna 2030 saavat olla 20,74 MtCO<sub>2</sub>-ekv, mikä tarkoittaa lähes 10 MtCO<sub>2</sub>-ekv vähennystarvetta.

**Taulukko 1. Kasvihuonepäästöt ja -poistumat sektoreittain jaoteltuna päästökaupan kuuluihin ja sen ulkopuolisiin päästöihin vuosina 2013-2018 (Tilastokeskus, Suomen Kasvihuonepäästöt, muokattu)**

Milj. tonnia CO <sub>2</sub> -ekv.	2013	2014	2015	2016	2017	2018 ennakko
Kokonaispäästö ilman LULUCF	63	58,8	55,2	58,1	55,4	56,5
Kotimaan lentoliikenteen CO <sub>2</sub> -päästö	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Päästökauppa	31,5	28,8	25,5	27,2	25,1	26,2
Päästökaupan ulkopuoliset päästöt*	31,3	29,8	29,5	30,7	30,1	30
LULUCF	-19,0	-21,8	-20,1	-18,5	-20,4	-14,2
Päästökaupan ulkopuoliset päästöt*	31,3	29,8	29,5	30,7	30,1	30
Kotimaan liikenne	11,8	10,7	10,7	11,9	11,3	11,5
Työkoneet	2,6	2,5	2,4	2,3	2,4	2,5
Rakennusten lämmitys	3,3	3,2	3	3,2	3	6,2
Muut energiaperäiset	2,6	2,7	2,7	2,8	3	
Teollisuusprosessit ja tuotteiden käyttö	1,9	1,9	2	1,9	1,9	1,7
Maatalous	6,5	6,6	6,5	6,6	6,5	6,3
Jätteiden käsittely	2,3	2,2	2,1	2	1,9	1,8

Päästöjen vähentämisen lisäksi energiankulutusta on vähennettävä energiatehokkuusvaatimusten täyttämiseksi. Suomen primäärienergian kokonaiskulutus 2018 oli 384,2 TWh. Tähän suurin vähennys on saavutettu teollisuudessa energian käytön tehostamisella, energiakatselmuksilla sekä energiansäästö- ja energiatehokkuussopimuksilla ja vähennyksen on arvioitu olevan 12,5 TWh. Lämpöpumpuilla on toiseksi suurin säästöpotentiaali, joka pelkästään pien- ja rivitaloissa on 7,5 TWh. Loppukäytön tavoite vuodelle 2030 on 305 TWh. [12]

## 2.1 Markkinaympäristö

Geoenergian vaikutusten ja kannattavuuden kannalta merkittävät markkinaympäristöt ovat lämpö- ja sähkömarkkinat. Tilastojen puuttumisen takia on tarkasteltava viimeisintä valmista vuotta, joka on 2017. Suomen primäärienergian kulutus 2017 oli 375,6 TWh. Loppukäytön osuus oli 309,6 TWh. Tästä 89 TWh, eli 29% kului asuin-, palvelu-, teollisuus- ja maatalousrakennusten tilojen ja käyttöveden lämmitykseen. [13] Kyseessä on

teollisuuden jälkeen toiseksi suurin energian loppukulutus sektori, ja merkittävä osuus koko Suomen energiankulutuksesta. Luku sisältää myös lämpöpumppuenergian, sekä lämpöpumppujen käyttämän sähkön.

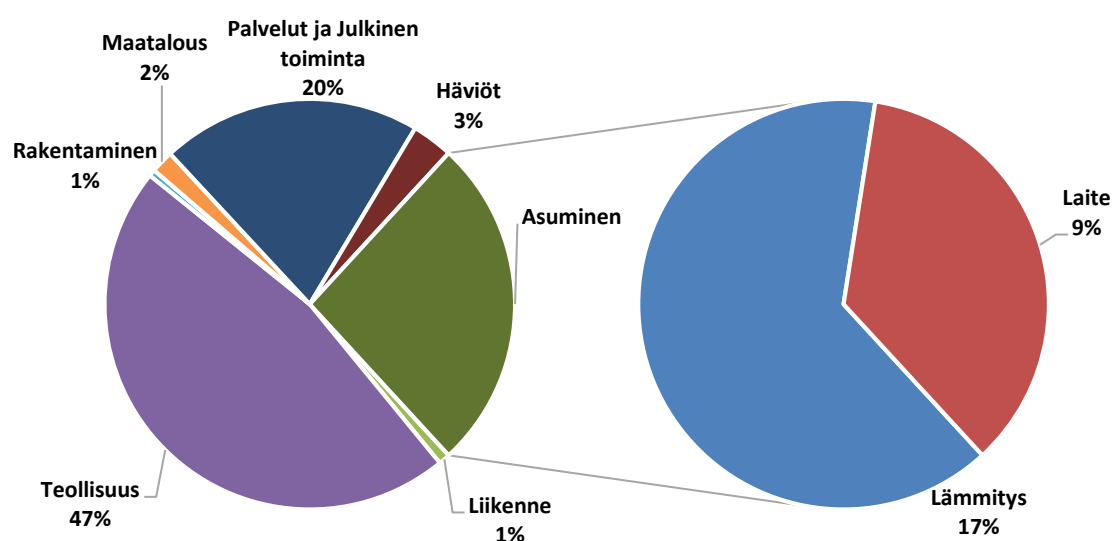
Seuraavaksi tarkastellaan sähkö- ja lämpömarkkinoiden piirteitä, energialähteitä ja päästöjä tarkemmin. Huomattavaa on, että Suomessa on paljon lämmön ja sähkön yhteistuotantoa, ja niiden päästöjä jaetaan energiamuodoille kahdella eri menetelmällä. Energiamenetelmällä päästöt jaetaan tuotetun energiamäärän mukaan huomioimatta energian jalostusarvoa, eli exergiaa. Hyödynjakomenetelmällä kulutettu polttoaine-energia jaetaan vaihtoehtoisten erillistuotantolaitosten hyötysuhteiden mukaan. Hyötysuhteina käytetään tällöin sähkölle 39% ja kaukolämmölle 90%. Hyödynjakomenetelmällä yhteistuotannon päästöt menevät enemmän sähkölle, energiamenetelmällä kaukolämmölle. Yhteistuotantoa on myös teollisuushöyryntuotannon kanssa. Energiateollisuus ry julkaisee tilastoja, jossa sähkön ominaispäästökerroin on laskettu energiamenetelmällä, ja kaukolämmön hyödynjakomenetelmällä. Tilastojen eroavaisuuden merkitys vähenee, kun yhteistuotannon päästöt pienenevät kivihiilen ja muiden fossiilisten polttoaineiden osuuden pienentyessä. Tässä työssä käytetään samoja laskentamenetelmiä, mutta tarkastellaan myös kokonaisuutta erikseen. Laskentaa esitetään luvussa 4. Vuosien 2015-2017 sähkön-, kaukolämmön- ja teollisuushöyryn tuotannon kokonaispäästöt ja päästökertoimet on esitelty energia- ja hyödynjakomenetelmällä taulukossa 2.

**Taulukko 2. Sähkön-, kaukolämmön- ja teollisuushöyryn ominaispäästökertoimet ja kokonaispäästöt 2015-2017. (Tilastokeskus, Energiavuosi 2018 taulukkopalvelu, taulukko 12.3.2, muokattu)**

Energiamenetelmä							
	Sähkö		Kaukolämpö		Teollisuushöyry		Yhteensä
	g/kWh	MtCO <sub>2</sub>	g/kWh	MtCO <sub>2</sub>	g/kWh	MtCO <sub>2</sub>	MtCO <sub>2</sub>
2015	105	6,9	204	7,2	87	4,5	18,6
2016	114	7,6	204	7,8	81	4,3	19,7
2017	100	6,5	195	7,5	71	3,8	17,8
Hyödynjakomenetelmä							
	Sähkö		Kaukolämpö		Teollisuushöyry		Yhteensä
	g/kWh	MtCO <sub>2</sub>	g/kWh	MtCO <sub>2</sub>	g/kWh	MtCO <sub>2</sub>	MtCO <sub>2</sub>
2015	135	8,9	159	5,6	79	4,1	18,6
2016	146	9,7	160	6,2	74	3,9	19,7
2017	131	8,5	152	5,8	65	3,5	17,8

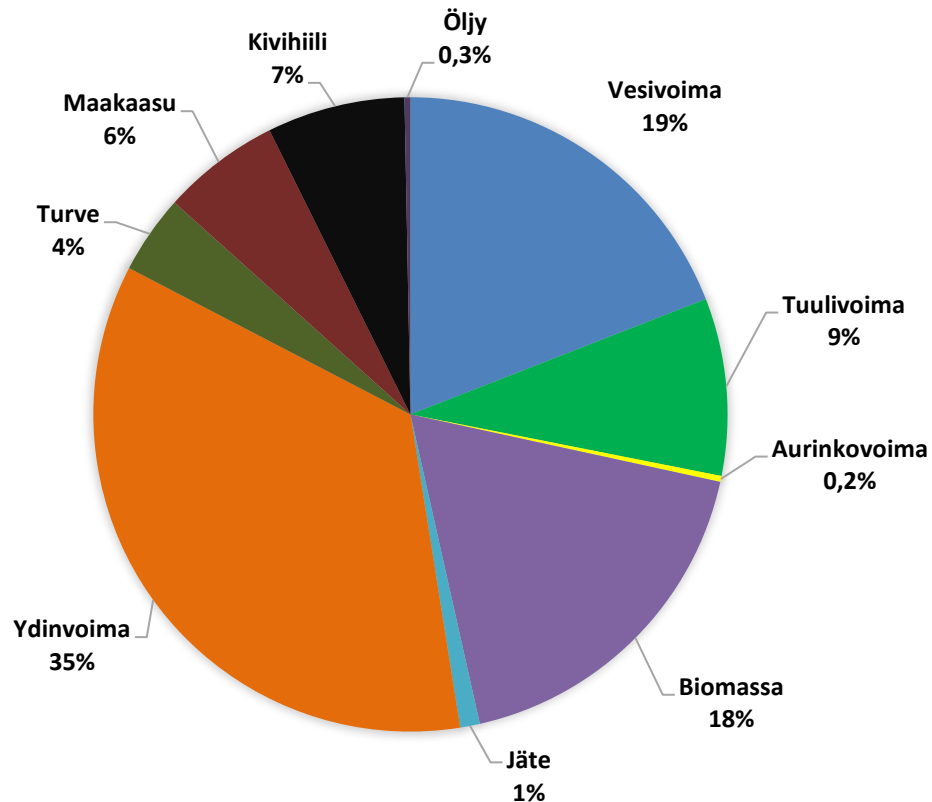
## 2.1.1 Sähköenergia

Sähkön tuotanto Suomessa 2018 oli 67,5 TWh ja kokonaiskulutus 87,5 TWh. Luvut eivät sisällä voimalaitosten omakäyttösähköä, jonka suuruus oli 2,7 TWh. Nettotuontia sähköenergiasta oli 20 TWh, enimmäkseen Ruotsista ja Venäjältä. Tuontisähkön päästöt lasketaan tuotantomaiden tuotantolaitoksille EU:n päästötavoitteissa. Sähkön osuus energian kokonaiskulutuksesta on noin 22,8%. [14] Sähkön verkkohäviöt ovat noin 3% kokonaiskulutuksesta [15]. Sähköntuotanto on 2010 luvulla siirtynyt jatkuvasti hiilineutraalimaksi, ja myös kokonaiskulutus on laskenut. Sähkön hankinnassa ja kulutuksessa on vuosittaisia eroja teollisuuden kulutuksen ja lämmitystarpeen mukaan. Vuosi 2018 oli sekä ominaispäästökertoimeltaan, että kulutukseltaan suurempi kuin edelliset vuodet [16]. Vuonna 2019 ominaispäästöt olivat ennätys alhaalla, kokonaiskulutus laski 1,7% ja uusiutuvilla tuotettiin ennätysmäärä sähköstä [17]. Sähkönkulutus sektoreittain vuodelta 2017 on esitetty kuvassa. Asumisen lämmitys sisältää lämpöpumppujen käytön sähköenergian. Lämpöpumppujen ja geoenergian osuutta ja vaikutuksia sähkönkulutukseen tarkastellaan tarkemmin alaluvussa 2.2.



**Kuva 2. Sähkönkulutus sektoreittain. (Tilastokeskus, Energiavuosi 2018 taulukkopalvelu, taulukko 3.2, muokattu)**

Sähköntuotannosta yli 80% on hiilineutraalia Suomessa, ja osuus tulee kasvamaan päästökaupan ja teknologian kehittymisen ansiosta, sekä uusien ydinvoimalaitosten valmistumisen myötä. Kuvassa 3 on esitetty sähkön tuotanto energialähteittäin vuonna 2019. Kokonaistuotanto oli 66 TWh. Ominaispäästökerroin vuonna 2019 oli 88 g/kWh. [17] Lämmityssähkön, sekä lämpöpumppujen käyttämän sähkön päästökertoimia ja kustannuksia lasketaan tarkemmin luvuissa 4 ja 5.



**Kuva 3. Sähkön tuotanto energialähteittäin 2019 (Energiateollisuus ry, Energia-vuosi 2019 Sähkö, muokattu)**

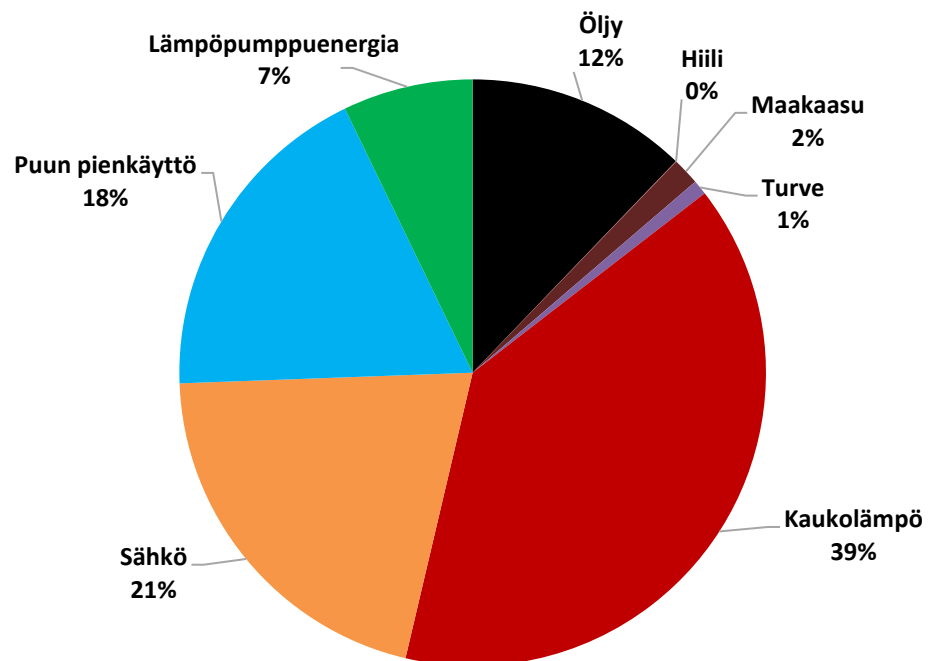
Kuvasta 3 nähdään, että sähkön tuotannosta lähes puolet on uusiutuvaa, ja 82% on hiilineutraalia. Suomen sähköntuotantokapasiteetti huippukuormituskaudella on noin 12 GW. [18] Kulutuspiikit ovat olleet viimevuosina noin 14,5 GW suuruisia. Loput sähkötehosta tulee tuontisähköstä. Olkiluoto 3 -ydinvoimalaitoksen on useiden viivästymisien jälkeen määrä siirtyä jatkuvaan sähköntuotantoon 2021. Tämän lisäksi rakennuslupaa hakee Hanhikivi 1 -ydinvoimalaitos, jonka on määrä valmistua 2025, mutta rakennustyöt eivät ole päässeet vielä alkamaan. Muita lämpövoimalaitosinvestointeja ei ole tiedossa. Näiden lisäksi tuuli- ja vesivoimaa on rakenteilla 365 MW. [19] Tuulivoimainvestointien oletetaan lisääntyvän uudistuvan tuulivoimalatekniikan parantaessa tuulivoiman kilpailuasemaa entisestään [20]. Tuulivoiman yleistymisen ongelmana on suuri säätövoiman tarve vaihtelevan tuulitilanteen mukaan. Yleistyvänä teknologioina lämpöpumppuja ja sähköautoja on esitetty osana ratkaisua. Lämpöpumpuilla voidaan varata energiaa lämpövarastoihin hyvällä hyötysuhteella kysyntäjoustona, sähköautoilla voidaan ladata tai purkaa akustoa säätövoimana ja kysyntäjoustona. [21]



## 2.1.2 Lämpöenergia

Rakennusten lämmitykseen on Suomessa kulunut tasaisesti 20-30% primäärienergian kokonaiskulutuksesta ja loppukäytöstä. Viimevuosina tämä luku on ollut 25-26% luokkaa. [22] [23] Lämmitysenergian kokonaiskulutus on kasvanut 18% vuodesta 2007. Lämmitettävä rakennusala on kasvanut lähes samassa suhteessa. Koko rakennuskannan ominaisenergiankulutus on pienentynyt energiasaneerauksien ja uusien rakennusvaatimusten myötä vuoden 2007 arvosta 162 kWh/m<sup>2</sup> arvoon, noin 160 kWh/m<sup>2</sup>. Uusissa kerrostalorakennuksissa ominaisenergiankulutus on alle 100 kWh/m<sup>2</sup>.

Lämmityksen energialähteet ovat siirtyneet jatkuvasti enemmän uusiutuvaan energiaan. Enää vain noin 15% lämpöenergiasta tulee erillislämmityksen fossiilisista polttoaineista. Kuitenkin Suomessa on tilastokeskuksen rakennuskanta – tiedoissa edelleen yli 300 000 öljy- ja kaasulämmitteistä rakennusta. Kaukolämpö on ylivoimaisesti suurin energialähde, ja se on keskittynyt selvästi suurempiin rakennuksiin, kuten toimistotiloihin, hoitoalan rakennuksiin ja asuinkerrostaloihin. Vanhemmissa pientaloissa on enemmän sähkö- ja puulämmitystä. [24] Kuvassa 4 on esitetty rakennusten lämmitysenergian osuudet energialähteittäin vuodelta 2017.



**Kuva 4. Rakennusten lämmityksen osuudet energialähteittäin (Tilastokeskus, Energiavuosi 2018 taulukkopalvelu, taulukko 7.3 muokattu)**

Tarkastellaan seuraavaksi lämmönlähteitä päästömielessä. Minkään lämmönlähteen infrastruktuurin rakentamisen tai kuljettamisen päästöjä ei tarkastella erikseen. Polttoaineiden päästökertoimina käytetään virallisia energiatiheys ja oletushapetuskertoimien tietoja Tilastokeskuksen polttoaineluokituksesta. [25] Taulukossa 3 on esitetty polttoaineiden ominaishiilidioksidipäästökertoimet, joita käytettiin myös tämän diplomityön kaikissa päästölaskelmissa. Hiilen päästökerroin on kivihiilen päästökerroin 0,99 hapettumiskertoimella. Kivihiili on suurin osa kaikesta poltetusta hiilestä, ja sillä on muihin hiilipolttoaineisiin verrattuna pieni ominaispäästökerroin. Öljyn päästökerroin on otettu raskaan ja kevyen polttoöljyn suhteesta 1:3, joka vastaa öljyjen käyttöä lämmityksessä. Jätepolttoaineeseen oletetaan yhteiskuntajätteen bio-osuudeksi 50%. Energiatiheyyksiä ei tarkastella polttoaineiden kuljetuksen kannalta.

**Taulukko 3. Polttoaineiden ominaispäästökertoimet (Tilastokeskus Polttoaineluokitus 2019, muokattu)**

Polttoaine	t/TJ	g/kWh
Kivihiili	92,7	333,7
Öljy	76,2	274,1
Maakaasu	55,3	199,1
Turve	107,6	387,4
Jäte	40,0	144,0

Huomattavaa on myös, että biopolttoaineista aiheutuu energiaan suhteutettuna suuremmat todelliset päästöt [25] Puun pienpoltosta aiheutuu haitallisia hiukkaspäästöjä, sekä mustahiilipäästöjä [2]. Lisäksi jokaisen kiinteistökohtaisen lämmitysratkaisun hyötysuhde vaikuttaa lämmityksen päästöihin. Päästökertoimia tarkastellaan tarkemmin luvussa 4. Kaikkien tuontipolttoaineiden hinnat ovat sidonnaisia maailman markkinatilanteeseen ja päästökaupan päästöoikeuden hintaan. Päästökertoimiensa ja siirtoinfrastruktuurin häviöiden puolesta kaasu on paras fossiilinen polttoaine, ja sen taloudellinen kilpailukyky on kasvanut päästökaupan ansiosta. Suomen maakaasu tulee pääosin Venäjältä [26]. Uusia putkilinjoja on rakenteilla Baltiasta. Muut polttoaineet joudutaan kuljettamaan laiva-, raide- ja/tai tierahdilla ulkomailta. Tuontipolttoaineet pienentävät Suomen energiaomavaraisuutta ja ovat alttiita kustannusten heilahteluille kansainvälisellä tasolla. [27]

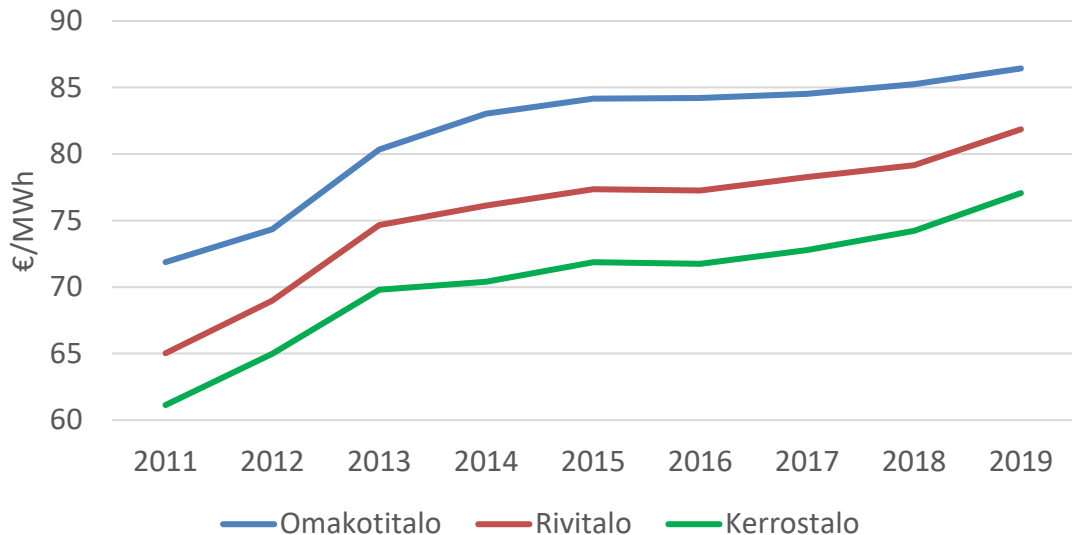
Kaukolämpö on suosituin lämmönlähde tiheästi asutuilla alueilla ja suurin energianlähde koko maassa. Tästä syystä sitä on syytä tarkastella tarkemmin. Sen etuna on asiakkaan näkökulmasta varma toimivuus, helppous ja joustavuus. Keskitetyissä lämpökeskuksissa optimoidulla ilmakertoimella ja kattilatekniikalla polttamisen hiukkaspäästöt voidaan suodattaa ja savukaasujen hukkalämmöt voidaan ottaa talteen. Kaukolämmöstä noin 67% tuotetaan yhteistuotantolaitoksissa, jolloin laitoksen kokonaishyötysuhde on

korkeampi kuin lauhdesähköllä. Palamisteknisesti ja infrastruktuurillisesti kaukolämpö on energiatehokkain tapa tuottaa lämpöä tiheästi rakennetulla alueella polttoaineista. Kuitenkin noin 50% kaukolämmöstä tuotetaan toistaiseksi fossiilisilla polttoaineilla ja turpeella. Kaukolämpöä tuotettiin vuonna 2018 noin 37,1 TWh ja sen ominaispäästökerroin oli hyödynjakomenetelmällä 147 g/kWh. [28] Vuoden 2019 vastaavat luvut olivat 36 TWh ja 130 g/kWh. Kaukolämmön jakeluhäviöt ovat noin 10%. [29] Todellisuudessa kaukolämmön päästöt riippuvat täysin energiayhtiön käyttämistä energialähteistä.

Suomessa on luovuttava kivihiilen energiapoltoista vuoden 2029 toukokuuhun mennessä [30]. Kaukolämmön hinnat ovat nousseet merkittävästi vanhan putki-infrastruktuurin korjauskustannusten ja polttoaineiden hinnan nousun myötä. Varsinkin Etelä-Suomessa biopolttoaineiden riittävyys ja lahopuun ja kantojen energiakäytöstä aiheutuva ekosysteemien ravinteiden poistuminen ja siitä seuraava luonnon biodiversiteetin kärsiminen ovat nousseet keskeisiksi ongelmiksi kaukolämmön tuotannon kannalta.

Biopolttoaineiden kuljettaminen kauempaa lisää liikenteen päästöjä, mikä siirtää päästöjä päästökaupparektorilta taakanjakorektorille, ja kustannukset nostavat kaukolämmön hintaa. Kuljetuskustannukset muodostavat suuren osan biopolttoaineiden, kuten metsähakkeen hankintaketjun kokonaiskustannuksista. Lahopuun käytön kustannukset ovat alhaisemman energiatiheytensä takia suhteessa vielä suuremmat. Muita uudistuksia Etelä-Suomen kaukolämmitykselle on tulossa teollisuuskokoisten merivesi, järvivesi tai geoenergia lämpöpumppujen, sekä lämpövarastojen muodossa. Päästökauppa ohjaa kaukolämmön polttoaineiden käyttöä pois fossiilisista ja turpeesta. [27]

Kaukolämmön tuotannossa on voimakkaita aluekohtaisia eroja niin päästöissä, kuin hinnassakin. Tässä työssä ei paneuduta alueellisiin eroihin, vaan kuvataan kaukolämpöä koko maan tasolla. Kuvassa 5 on esitetty kaukolämmön kokonaishinnan kehitys energiayksikköä kohti, asiakasryhmiin jaettuna ja asiakkaiden lukumäärällä painotettuna. Kulutuskohteiden energiankulutuksen vertailuarvot ovat 18 MWh/v, 150 MWh/v ja 600 MWh/v. Hinnat sisältävät tehomaksun, energiamaksun ja verot. Hinnan nousu vuosina 2015-2019 on ollut noin 3% vuodessa. [31]



**Kuva 5. Kaukolämmön asiakaslukumäärällä painotettu keskihinta loppuasiakkaalle asiakasryhmittäin 2011-2019 (Energiateollisuus ry, kaukolämmön hintatieto 2019, muokattu)**

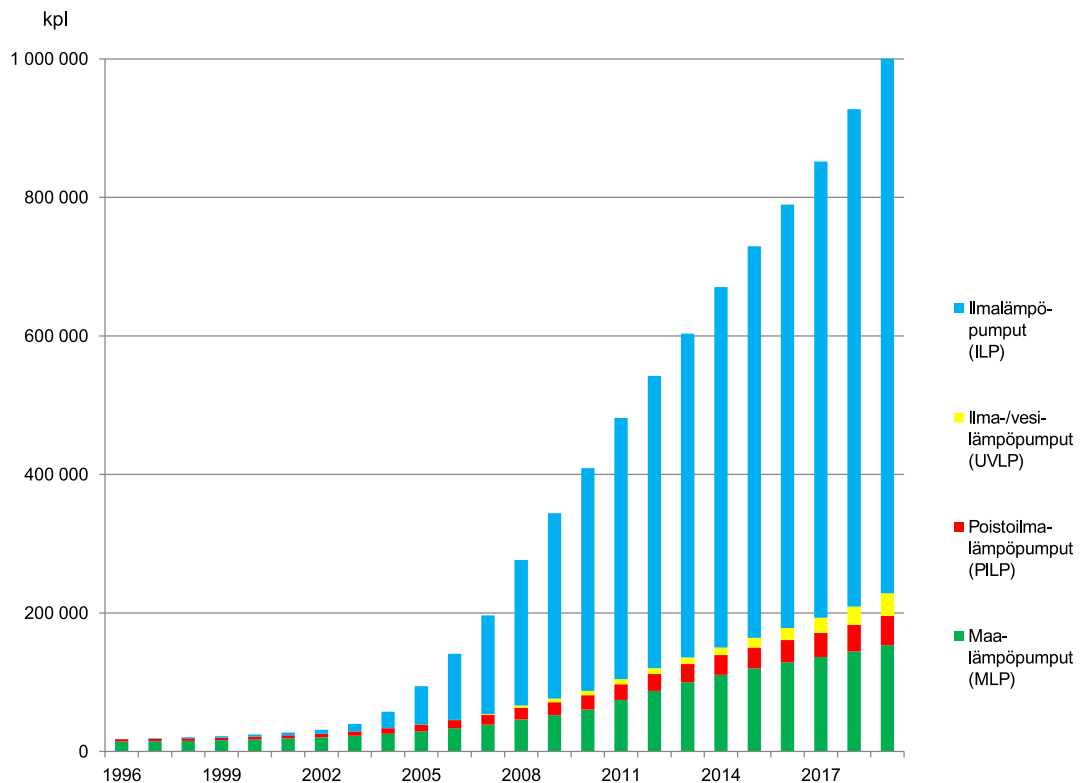
## 2.2 Geoenergian rooli Suomessa

Vuonna 2017 lämpöpumpuilla tuotettiin yhteensä noin 10,5 TWh lämpöenergiaa asuin ja palvelurakennuksien tilalämmitykseen. Tästä 5,5 TWh on ympäristöstä kerättyä lämpöenergiaa, ja loput 5 TWh kompressorisähköä. Kun mukaan lasketaan teollisuusrakennukset ja maatalousrakennukset, saadaan kuvassa 4 esitetty 6,8 TWh lämpöpumpuenergiaa, eli 7% koko rakennuskannan lämmitysenergian kulutuksesta. Geoenergian osuus lämpöpumpuenergiasta oli 2,5 TWh. Maalämpöpumput ovat lämpöpumpuista kapasiteetiltaan suurimpia ja toimivat parhaalla hyötysuhteella, sillä lämmönlähde on tasainen ja korkeammassa lämpötilassa muihin kiinteistölämpöpumppeihin verrattuna. [32] Huomattavaa on myös, että lämpöpumppujen hyötysuhteen, ja sähkölämmityksen korvaamisen ja vuoksi lämmityssähkön vuosikulutus on pientaloalueella pysynyt ennallaan. [27] Geoenergiajärjestelmässä lämmönlähteenä voi pienkohteissa olla pintamaa tai vesistö, sekä nykyään yleisin kalliolämpö, jossa kallioon porataan 100-400 m syvä energiakaivo. Suurkohteissa ainoa tapa on porata useita syviä kaivoja riittävän energian saamiseksi pienestä alueesta. Geoenergiajärjestelmää tarkastellaan lähemmin luvussa 3.

Maalämpöpumpujärjestelmän asentaminen vaatii aina vähintään toimenpideluvan, ja joissain kunnissa ja suuremmissa kallioporauksissa rakennusluvan. Luvan saaminen voi kestää joissakin tapauksissa jopa yli 6kk ja lupakäsittely vaihtelee merkittävästi kunnittain. Liian pitkä käsittelyaika voi johtaa joissakin tapauksissa investoinnin perumiseen ja

esimerkiksi kaukolämpö on uudiskohteissa usein valittavissa ilman lupakäsittelyä. [33] Kaukolämpöyhtiöt ovat usein kaupungin omistuksessa.

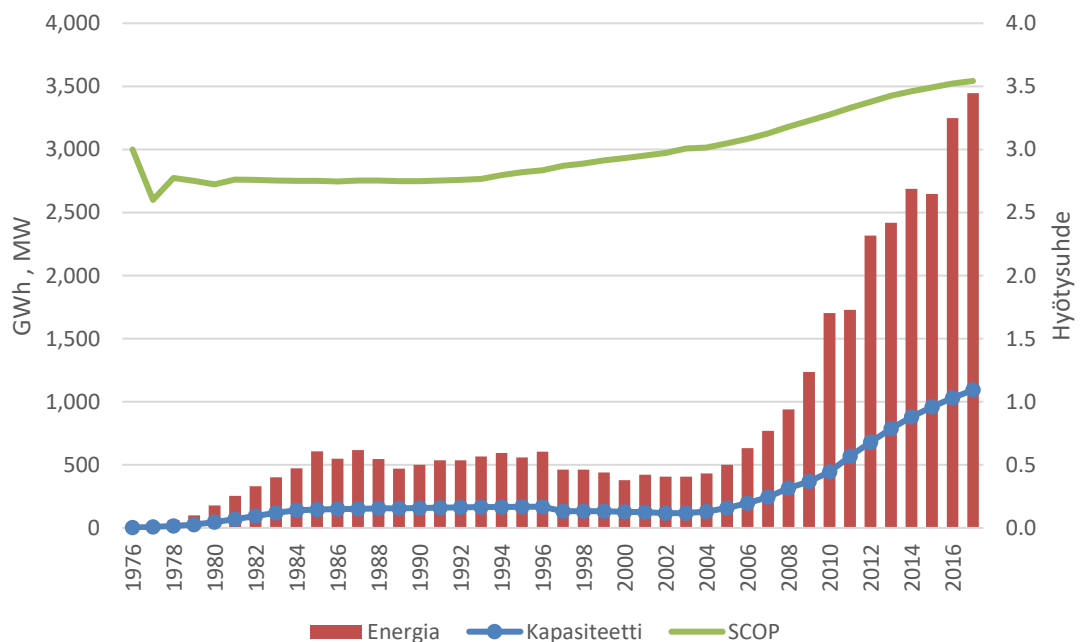
Kuvassa 6 on esitetty Suomen Lämpöpumppuyhdistyksen (SULPU) tilastoista kumulatiivinen lämpöpumppujen myynti kappalemääränä. Pumppujen myynti on lähtenyt merkittävään kasvuun noin vuonna 2007. Tuotetussa energiassa maalämpöpumput ovat merkittävästi suuremmassa roolissa. Vuonna 2019 myytiin enemmän lämpöpumppuja kuin koskaan, ja etenkin suuritehoiset maalämpöpumput ovat lisääntyneet. Yli 100 kW maalämpöpumppuja myytiin Sulpun tilaston mukaan 15 kappaletta, eikä siihen sisälly teollisuusluokan lämpöpumput, tai Sulpun ulkopuoliset asennukset. Maalämpöpumppuja myytiin yhteensä noin 9000 kpl, ja niistä 946 kpl oli teholtaan 26-100kW, eli rivi- ja kerrostalo lämpöpumppuja. [34] Geoenergia onkin taloudellisesti järkevää asentaa suhteellisen moneen jo kaukolämpöä käyttävään taloyhtiöön. [27]



**Kuva 6. Suomeen myydyt lämpöpumput, kumulatiivinen (Sulpu, tilastot 2019)**

Geoenergian osuus lämpöpumppuenergiassa on kasvanut. Päälämmitysmuotona geoenergiaa käyttää vain muutaman prosentin osuus kustakin rakennustyyppistä. Suuren rakennuskannan vuoksi geoenergia kasvattaa osuuttaan hitaasti. Uudisrakennuksessa geoenergian markkinaosuus kaikista rakennustyypeistä on kuitenkin yli 20% vuonna 2019 [29]. Lämmitysjärjestelmän lämmityksen ja jäähdytyksen yhdistäminen suosii maalämpöpumppujen käyttöä varsinkin suurissa palvelukohteissa, missä on tarvetta jatkuvalle jäähdytykselle osassa rakennusta. Maalämpöpumppujen kapasiteetin, tuotetun

energian ja hyötysuhteen kehitys on esitetty kuvassa 7. Geoenergian suuri hyötysuhde saa vuoden 2017 sähköntuotannon ominaispäästökertoimella ja vuosihyötysuhteella, eli SCOP-luvulla (Seasonal Coefficient of Performance) 3,5 laskennallisen ominaispäästökertoimen 28 g/kWh. Vuoden 2019 arvo olisi noin 25 g/kWh. Luvuissa 4 ja 5 tarkastellaan geoenergiajärjestelmän käyttämän sähkön todellista päästökerrointa tuntidatan muodossa. Kun vähäpäästöisempään lämmitysmuotoon vaihtaminen on taloudellisesti kannattavaa, on päästövähennys ja sen mahdollinen tukeminen kustannustehokasta valtiotaloudellisesti. Kustannustehokkuudesta ja energiatuesta puhutaan tarkemmin alaluvussa 3.3. Perinteisen kiinteistökohtaisen geoenergian lisäksi on useita syväkaivo-pilot-tihankkeita, joissa tavoitellaan geoenergian hyödyntämistä keskitetysti kaukolämmityksessä.



**Kuva 7. Maalämpöpumppujen kapasiteetti, lämmöntuotanto ja hyötysuhde Suomessa 1976-2017. (Tilastokeskus Energiavuosi 2018 taulukkopalvelu)**

Sähkön päästöjen lisäksi lämpöpumppujen päästöistä tulee huomioida kylmäaineiden F-kaasupäästöt (Fluoratut kasvihuonekaasut). Suurin osa F-kaasupäästöistä muodostuu kylmä- ja ilmastointilaitteiden käytöstä ja raportoidaan teollisuusprosessien yhteydessä. Suomen F-kaasujen päästöt ovat pysyneet tasaisina 2005-2015 ja lähteneet laskuun siitä eteenpäin. F-kaasujen kokonaispäästöt olivat 2018 noin 1,3 MtCO<sub>2</sub>-ekv, kun kaasujen GWP (Global Warming Potential) luvut otettiin huomioon. Lähes kaikki F-kaasupäästöt aiheutuivat kylmä- ja ilmastointilaitteista, joihin luetaan myös lämpöpumput. Päästöjen lasku ja lämpöpumppujen käytön samanaikainen nousu johtuvat suurelta osin EU:n F-kaasuasetuksesta. Asetuksessa kielletään kylmäaineet, joiden GWP-arvo on yli 2500.

[2] Lämpöpumpuista maalämpöpumput ovat tehtaalta poistuessaan hermeettisesti suljettuja järjestelmiä, jossa kylmäaine ei poistu lämpöpumpun seinien sisäisestä kierrosta. Esimerkiksi ilmalämpöpumpuissa lämmönsiirrin ja siten putkisto on kosketuksissa ulkoilmaan ja sääolosuhteille, ja on siten alttiimpi vuototilanteille. Kylmäaineissa ollaan siirtymässä yhä enemmän luonnollisiin aineisiin, kuten hiilidioksidiin, ammoniakkiin ja hiilivetymiin. Kylmäaineissa pyritään käyttötilanteessa optimi hyötysuhteeseen, pieniin pumpaus ja kompressointi häviöihin, sekä vikatilanteissa myrkyttömyyteen ja palamattomuuteen. [35]

### 3. GEOENERGIAJÄRJESTELMÄN TOIMINTA

Geoenergialla tarkoitetaan maa- ja kallioperään varastoitunutta lämpöenergiaa. Pinta-maahan varastoitunut lämpö on peräisin auringon säteilystä, ja siihen vaikuttaa vuoden-aika ja sääolosuhteet. Yli 10-15 m syvyydestä alkaa maan kuumasta ytimestä ja vaipasta johtuva lämpö vaikuttaa enemmän. Tällöin puhutaan joskus myös geotermisestä läm-möstä. Suomessa kallioperän häiriintymätön lämpötila 100-200 m syvyydessä on yleensä 7-9 °C ja kylmenee Pohjoista kohti. Kallio on kesällä viileämpi ja talvella lämpi-mämpi kuin ilma ja sijainnin mukaan lämpötilaltaan lähes muuttumaton. Lämpötilan kas-vua syvemmälle mentäessä kuvaava geotermien gradientti on suomessa noin 1-1,5 °C/100m. [6] [37] [36]

Geoenergiajärjestelmä eroaa perinteisistä lämmitysmuodoista merkittävästi. Järjestel-mässä on useita eri lämmönsiirtopintoja ja -nesteitä, sekä niitä ohjaavia toimilaitteita ja tekijöitä. Myös lämmönlähde eroaa muista järjestelmistä. Geoenergiajärjestelmän mitoi-tukseen, toimivuuteen ja kannattavuuteen vaikuttaa suuresti energiankulutusprofiili, ra-kennuksen lämmönjakojärjestelmä ja muut kohdespesifit olosuhteet. Kuluttajan kannalta geoenergian huolelliseen mitoitukseen tulisi panostaa. Tämän myötä välttyttäisiin erilais-ten mitoituskäytäntöjen aiheuttamilta mahdollisilta ali- ja ylimitoitetuilta energiakaivoken-tiltä [6]. Kulutuskohteissa on kuitenkin paljon eroja, joten yhtenäisen mitoitustavan luo-minen on haastavaa.

Tässä luvussa tarkastellaan energiakaivokenttä-geoenergiajärjestelmän toimintaa ja komponentteja. Lisäksi tarkastellaan tässä työssä tutkittavien tyypillisten suurkohteiden - asuinkerrostalojen ja palvelurakennusten – kulutusprofiileja ja järjestelmään vaadittavia investointeja. Viimeiseksi esitetään geoenergiajärjestelmien mahdollisuuksia ja haas-teita yleisesti.

#### 3.1 Järjestelmän kuvaus

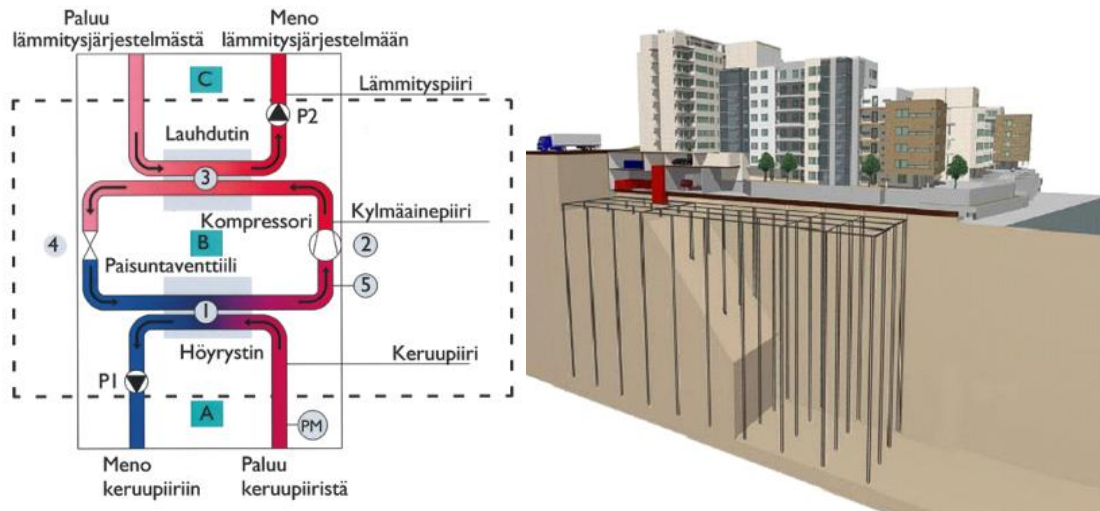
Lämmönsiirtorajapintoja on geoenergiajärjestelmässä useampia kuin polttoaineilla toimi-vassa lämmitysjärjestelmässä, jossa lämmityskierron vesi lämpiää kattilassa, tai kauko-lämpöjärjestelmässä, jossa lämmityskierron vesi lämpiää kaukolämpölämmönvaihti-messa. Lämpöpumpun toiminta perustuu kylmäaineen sopivissa lämpötiloissa tapahtu-viin faasimuutoksiin. Kylmäaineen höyrystymislämpötilaa manipuloidaan paineistuksen avulla, mikä saa aikaan energian siirtymisen käyttötarkoitukseen sopivissa lämpötiloissa.



Tässä työssä ei ole oleellista perehtyä jokaisen komponentin toimintaan, mutta niiden yhteistoiminta ja siitä johtuva hyötysuhdevaikutus on oleellista laskennan kannalta.

Lämpöpumppujärjestelmässä on aina jokin ulkoinen lämmönlähde, josta lämpöenergia otetaan kylmäaineeseen. Geoenergiajärjestelmässä tämä on energiakaivokenttä, josta siirretään lämpöä lämmönkeruunesteeseen ja keruuputkiston avulla. Keruuneste kiertää kylmänä energiakaivossa olevan kollektoriputken läpi ja lämpiää samalla. Lämmennyt keruuneste kiertää maalämpöpumpun höyrystimen keruupuolelle, jossa lämpöenergiaa siirtyy kylmäaineen faasimuutokseen. Keruuneste ja kylmäaine eivät koskaan sekoitu. Höyrystynyt kylmäaine kompressoidaan, jolloin sen lämpötila ja paine nousevat. Tulistettu höyry siirtyy lämpöpumpun lauhttimelle, jossa se lauhtuu korkeassa paineessa luovuttaen keruunesteestä ja kompressorin työstä saadun energian käyttökohteen lämmitysjärjestelmän lämmityskierron veteen. Tämän jälkeen nestemäinen kylmäaine menee paisuntaventtiilille. Paisuntaventtiili alentaa kylmäaineen painetta, mikä ei laske kylmäaineen entalpiaa, mutta alentaa lämpötilaa ja muuttaa kylmäaineen kaasuneste – seokseksi. Tästä kylmäaine jatkaa kiertoaan takaisin höyrystimelle. Lämmityskierron vesi ohjataan oman kiertopumpun ja jakelujärjestelmän avulla kiinteistön lämmitystarpeisiin.

Lämpöpumpuissa voi olla yksittäinen on/off-, tai useampi portaittain toimiva on/off-kompressori, tai taajuusmuuttajalla varustettu muuttuva kierrosnopeuksellinen kompressori. Lauhttimen lisäksi lämpöpumpussa voi olla erillinen tulistuslauhdutin, jossa korkealämpötilaisesta tulistetusta kaasusta otetaan korkealämpötilaista energiaa lämmintä käyttövetä varten. Silloin maalämpöpumppu pystyy tekemään lämmitysenergiaa sekä tilalämmitykseen, että käyttöveteen yhtäaikaaisesti. Lisäksi on olemassa lauhteen alijäähdytystä hyödyntäviä, sekä imukaasulämmönvaihtimilla varustettuja lämpöpumppuja. Suurissa kohteissa voi olla useita lämpöpumppuja, joista osa tekee tilalämmitystä ja osa käyttövetä. Kuvassa 8 on esitetty komponentit ja toimintaperiaate yksinkertaistettuna, sekä asuinkerrostalon geoenergiajärjestelmän kokonaiskuva.



**Kuva 8. Maalämpöpumpun toimintaperiaate (vasen, Juvonen & Lapinniemi 2013) ja keruupiiri asuinkerrostoalossa (oikea, Windfross Energy, Geoenergy)**

Lämpöpumpun osatehomitoitus on käyttö- ja investointikustannusten optimointia. Täys-tehomitoituksessa geoenergiajärjestelmä kattaa koko kiinteistön lämmitysenergian tarpeen, ja siinä on siksi pienimmät käyttökustannukset. Järjestelmä voidaan mitoittaa myös osatehoiseksi, jolloin se tavallisesti kattaa 60-85% rakennuksen huipputehontarpeesta. Huipputehotunteja on usein todella vähän, joten osatehomitoituksella voidaan tuottaa jopa 99% rakennuksen energiantarpeesta. Tällöin investointikustannuksissa voidaan säästää energiakaivokentän ja lämpöpumpun kohdalla. Kovimmilla pakkasilla tarvitaan silloin lisälämmitystä, joka tavallisesti tuotetaan varaajien sähkövastuksilla. Saneerauskohteissa voidaan myös jättää vanha järjestelmä huipputehovaraukseksi. [38] Huipputehovarauksen ongelmana on lämmönjakohuoneen rajallinen tila ja kaukolämpökohteissa vaikeampi huippukuormatoimituksen sopiminen lämpöyhtiön kanssa. Tarkasteltujen kiinteistötyyppien energiankulutusprofiileja ja osatehon vaikutus on esitetty myöhemmin kuvassa 12.

Maalämpöpumpun toimintaan vaikuttaa keruupuolen lämmöntuontilämpötila, kylmäaineen ominaisuudet, sekä vaadittu lämpöpumpun tuottama lämpötilataso. Rakennuksen lämmöntarve on järjestelmästä riippumatta vakio. Toisaalta kiinteistön huippukulutuspiikkejä voidaan hieman tasata geoenergiajärjestelmissä lämmitys- ja käyttövesivaraajissa olevalla puskurijoustolla, jota ei varaajattomissa lämmitysmuodoissa kuten kaukolämmössä ole. Lämpöpumput eroavat kuitenkin muista lämmitysjärjestelmistä siinä, että niiden hyötysuhde on sitä parempi, mitä pienempi lämmönlähteen ja lämmityskohteen lämpötilaero on.

Maalämpöpumpuilla on muita lämpöpumppuja korkeammat hyötysuhteet, sillä lämmönlähteen lämpötila on lämmitystarpeeseen nähden korkea ja tasainen. Hetkellisestä hyötysuhteesta käytetään termiä COP (Coefficient of Performance). COP luvut ilmoitetaan EN 14511 -standardin mukaan eri lämpötilatasoille, joita ovat 0/35°C, 0/45°C ja 0/55°C. Höyrystimen lämpötilatasoa säädetään usein elektronisella paisuntaventtiilillä. 0°C viittää lämmönlähteen lämpötilatasoon, eli keruunesteen keskimääräiseen lämpötilaan. Lauhduttimen lämpötilatasoa säädetään kompressorin painetasoa säätämällä. VTT:n Suomalaisten lämpöpumppujen uusiutuvan energian tuotto -tutkimuksessa 2014 arvioitiin SCOP-luvuiksi 4,8 0/35°C tilalämmityksessä ja 2,7 0/52°C käyttöveden lämmityksessä tuntikohtaisella mallinnuksella ilman kohdeperäistä kulutusdataa. [39] Käyttöveden esilämmityksellä voidaan parantaa käyttöveden lämmityksen hyötysuhdetta.

Rakennuksen lämmityksen kannalta korkea lämpötilataso tarkoittaa pienempiä lämmönsiirtopintoja huoneistossa. Vanhoissa paljon kuluttavissa rakennuksissa lämmitysverkko on usein korkealämpötilainen. Lattialämmityskohteissa mitoitetaan suuren lämmönsiirtopinta-alan ansiosta 35°C lämmityskiertojärjestelmä. [38] Suomalaiset lämpöpumput pysyvät parhaimmillaan yli 5 COP lukuun 0/35°C tasolla. Nykyään lämpöpumpuissa on myös suuritehoisia taajuusmuuttuja vetoisia kompressoreita, joiden kierroslukua voidaan ohjata portaattomasti. Niillä voidaan säätää kompressorin käyntitehoa ja optimoida hyötysuhdetta ja kulutusta. Kuvassa 9 on esitetty R134a (CH<sub>2</sub>FCF<sub>3</sub>, 1,1,1,2-tetrafluorietaani) kylmäaineen kiertosykli lämpöpumpussa. R134a on yleinen fluorattu hiilivety – kylmäaine, jonka GWP luku on 1430. Kuvan sykliä pisteet menevät järjestyksessä:

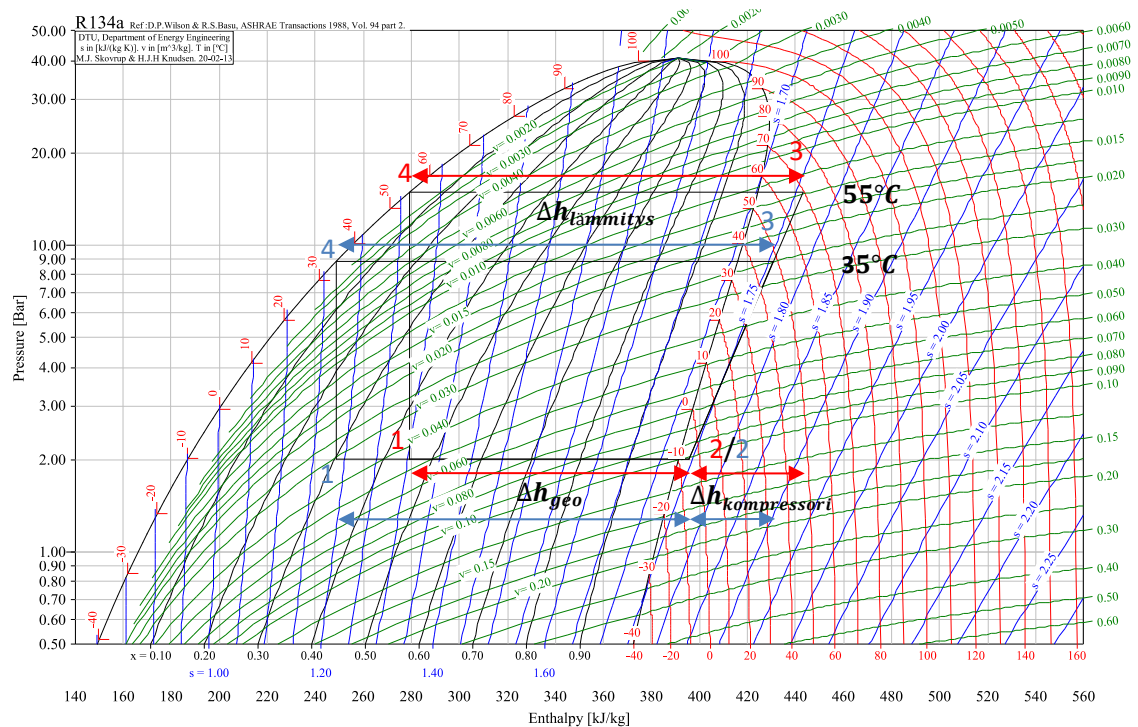
- |       |                   |
|-------|-------------------|
| 1 → 2 | Höyrystin         |
| 2 → 3 | Kompressori       |
| 3 → 4 | Lauhdutin         |
| 4 → 1 | Paisuntaventtiili |

Kuvassa 9 on myös esitetty kierron aikaiset kylmäaineen entalpiamuutokset. Lämpöpumpun kylmäainekierron hyötysuhde ilman oheislaitteita tai häviöitä lasketaan entalpioista kaavalla

$$COP = \frac{\Delta h_{\text{lämmitys}}}{\Delta h_{\text{kompressori}}}, \quad (1)$$

missä  $\Delta h_{\text{lämmitys}}$  on lauhduttimella tapahtuva kylmäaineen entalpiamuutos [kJ/kg] ja  $\Delta h_{\text{kompressori}}$  on kompressorin kylmäaineeseen tekemän työn aikaan saama entalpiamuutos. Näiden entalpiamuutoksien erotus on höyrystimellä tapahtuva entalpiamuutos.

Höyrystimellä kylmäaineeseen siirtyvä energia on lämmönlähteestä peräisin oleva, luvussa 2 mainittu lämpöpumppuenergia.



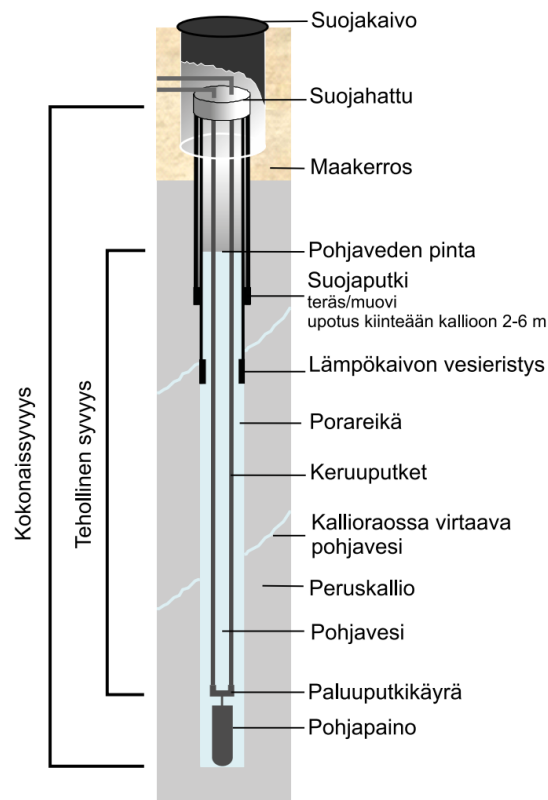
**Kuva 9. R134a kylmäaineen syklit 35°C ja 55°C lauhtumislämpötiloissa (CoolPack IPU, muokattu)**

Kylmäainekierron oletukset ovat -10°C höyrystinlämpötila, 5K tulistusaste, ei alijäähdytystä, 35°C ja 55°C lauhtumislämpötila, isentrooppinen paisunta ja 90% kompressorihyötysuhde. Syklien hyötysuhteet tässä teoreettisessa tapauksessa ovat noin 5,1 ja 3,4. Kuvasta nähdään siten hyvin lämpötilatason vaikutus hyötysuhteeseen.

Hetkellistä COP-lukua paremmin järjestelmän hyötysuhdetta kuvaa SPF-luku (Seasonal Performance Factor), joka kuvaa koko vuoden aikana tuotetun lämmön suhdetta käytettyyn sähköenergiaan, ja sisältää lisäsähkön ja keruunesteen kiertopumpun sähkön kulutuksen. SPF-luku on Suomen ilmastotilanteessa suurempi kuin lämpöpumppujen standardinmukaiset COP-luvut. Tämä johtuu siitä, että suuren osan vuodesta lämpöpumpun ei tarvitse tehdä lämmitysverkon huippukuorman lämpötilatasoa vastaavaa lämmitysvettä, vaan alhaisempi lämpötila riittää. Toisaalta pitkään jatkuva huippukuorma huonontaa hyötysuhdetta keruunesteen lämpötilan laskiessa alle standardin 0°C:een.

### 3.1.1 Energiakaivokenttä

Lämpöpumpun tehon mitoittamisen lisäksi tärkein osa järjestelmän toimivuutta on energiakaivokenttä. Kentällä tarkoitetaan useaa, yleensä 200-400 m syvyistä porakaivoa, johon asennetaan keruuputket, eli kollektorit. Kaivot porataan erilleen toisistaan, ja voidaan porata vinoon siten, että niistä saataisiin energiaa mahdollisimman suurelta alueelta. Suomessa poraukseen käytetään tavallisesti 4,5” porakruunua ja asennetut putket ovat Single-U tyyppiä. Maaporauksen osalta kaivoon asennetaan porauksen yhteydessä teräksinen suojaputki, joka tiivistetään vähintään 2 m kiinteään kallioon. Joissain maissa valmis porakaivo täytetään inertillä hyvin lämpöä johtavalla aineella, mutta Suomessa kaivon annetaan täyttyä pohjavedellä. Kollektori kytketään saumattomalla muovihitsausliitännällä lämpöeristettyyn vaakaputkistoon, ja keruuneste kiertää lämpöpumpulle, siirtäen lämpöä kaivoista pumpulle. Kuvassa 10 on esitelty energiakaivon rakenne.



**Kuva 10. Energiakaivon rakenne. (Juvonen & Lapinniemi 2013)**

Kuvassa näkyvä tehollinen syvyys tarkoittaa kaivoon poratuista metreistä sitä osuutta, jossa kollektori on pohjaveden peitossa. Lämpö siirtyy keruunesteeseen vain kollektorin siltä osuudelta, jossa kollektori on suorassa kosketuksessa hyvin lämpöä siirtävään veteen. Tehollisesta syvyydestä käytetään myös nimitystä aktiivisyvyys.

Kaivokentän mitoituksessa on muun muassa huomioitava:

- Kulutusprofiili
- Maapeitteen paksuus
- Pohjaveden pinnankorkeus
- Kallion häiriintymätön lämpötila
- Kallion ominaislämpökapasiteetti  $C_v$
- Kallion lämmönjohtavuus  $\lambda$
- Energiakaivon porakaivovastus

Ennen geoenergiajärjestelmän asennusta kallioperä on termodynaamisessa tasapainotilassa. Syvyydestä johtuva lämpövuoto on tasapainossa maanpinnalta pois säteilevään energiaan. Kallion häiriintymätön lämpötila ja ominaislämpökapasiteetti määrittävät silloin kalliomassaan varastoituneen lämpöenergian. Lämmönjohtavuus taas määrittää, kuinka tehokkaasti energia siirtyy kalliomassassa. Mitä suurempi lämmönjohtavuus, sitä nopeammin energia siirtyy kauempaa kalliomassassa, ja sitä enemmän energiaa voidaan ottaa porattua metriä kohti. Maapeitettä ei lasketa aktiivimetreihin, sillä maaperän lämmönjohtavuus on merkittävästi pienempi kuin kallion, ja maa on eristetty keruuputkistosta suojaputkella. Jos pohjaveden pinta on korkealla, se lisää lämmönjohtavuutta maapeitteessä. Virtaava pohjavesi lisää lämmönjohtavuutta merkittävästi, ja se tuo energiaa kentän laskennallisen kalliomassan ulkopuolelta. Virtaava pohjavesi on kuitenkin harvinaista.

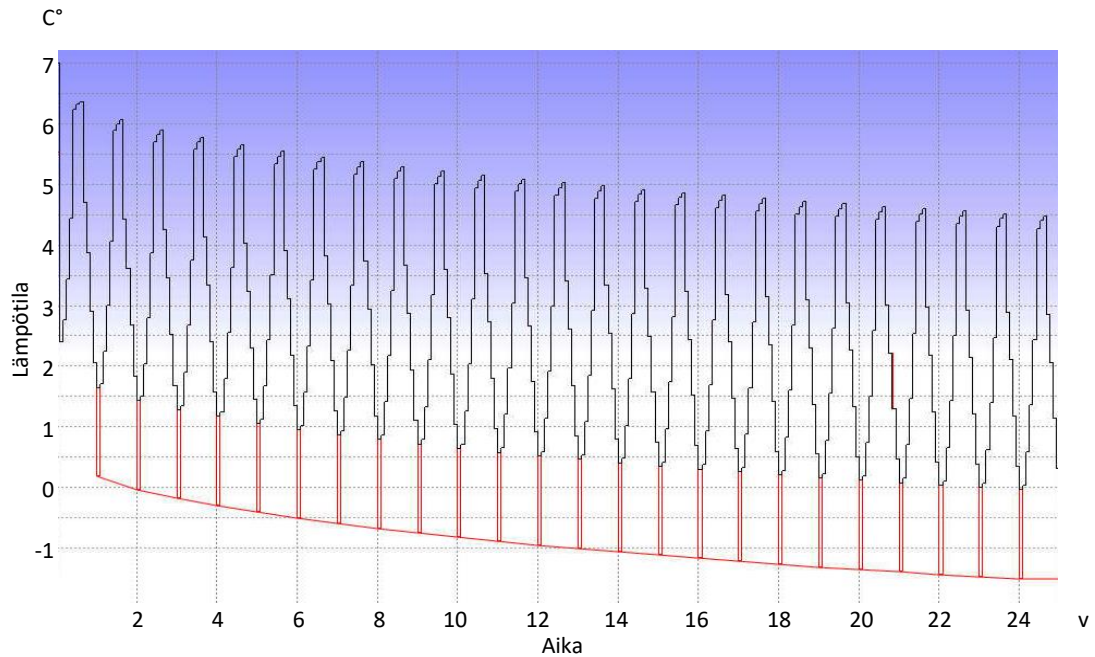
Energiakaivon mitoitukseen vaikuttavien ominaisuuksien selvittämiseksi on kehitetty TRT-mittausmenetelmä. Sen avulla voidaan mitata testiä varten poratun energiakaivon lämpötila ja lämmönsiirtymisen tehokkuus, kun kaivoon syötetään energiaa lämmitetyn keruunesteen muodossa. Datat ja simulointien avulla kenttä voidaan optimoida ja vältetään kallioperän tuntemattomista termisistä ominaisuuksista johtuvilta ali- ja ylimitoituksilta. Suurissa geoenergiakohteissa TRT-testi on erittäin suositeltava ja hyvä varmistus kustannustehokkaaseen järjestelmään. [38]

Energiaa voidaan kestävästi ottaa kalliosta vain rajallisesti, mikä eroaa kuluttajan näkökulmasta muista lämmitysmuodoista. Esimerkiksi öljykattilan tai kaukolämmönvaihtimen mitoitus tehdään tehon mukaan, jolloin varmistetaan lämmitystehon riittävyys huippukuormatilanteessa. Energia on varastoitunut öljysäiliöön ja sitä saa lisää tilaamalla lisää öljyä. Kaukolämpöenergia toimitetaan kaukolämpöverkossa ja tulee asiakkaalle näkyviin vain lämmityskustannuksissa. Geoenergiajärjestelmä tulee siis mitoittaa tavallisessa

lämmityskohteessa energian mukaan. Joissain tapauksissa kentästä vuositason otettava energia voi olla maltillisempi suhteessa huippukuormassa vaadittuun lämpötehoon. Tällöin kenttä tulee mitoittaa metriä kohti otettavan lämpötehon mukaan, jotta lämpöä ei oteta liian paljoa pienestä määrästä kalliomassaa, mikä jäähdyttää kaivot paikallisesti. Silloin on huomioitava kulutuksen ominaisuuksia tarkemmin, kuten kuinka pitkään huippukuorma jatkuu yhtäjaksoisesti. Järjestelmän osatehoisuus vaikuttaa tähän merkittävästi.

Tavallisella kuormituksella kallio jäähtyy lämmityskaudella, kun siitä otetaan enemmän energiaa, ja lämpiää taas kesäaikana. Vuosien päästä vakiokuormituksilla saavutetaan uusi tasapainotila, jossa suurempi lämpötilaero lisää lämmön johtumista kallioperästä, kunnes keruunesteen mukana lämpöä siirtyy pois saman verran vuodessa kuin kallioon varastoituu. Oikein mitoitettu kenttä ottaa energiaa niin suuresta kalliomassasta, että keruunesteen lämpötila ei mene pitkäksi aikaa merkittävästi alle 0°C ja siten kollektoriputkea ympäröivä pohjavesi ei jäädy energiakaivossa. Kausittainen alitus ei haittaa, sillä pohjaveden faasimuutoksesta saadaan vielä puskurina energiaa ja pohjavesi on kuormituksessa aina lämpimämpää kuin keruuneste.

Kuvassa 11 on esitetty yksinkertaistettu kaivokentän simulointi EED 4.20 ohjelmistolla (Earth Energy Design), jossa tasapainotila saavutetaan 25 vuoden kuluttua ja keruunesteen keskilämpötila ei mene alle -1,5 °C huippukuormalla. Simuloinnissa käytettiin graniitin lämpöominaisuuksia ja 330 MWh vuosikulutusta 90 kW lämpöpumpulla Etelä-Suomessa. Kaivokenttä on L muotoinen 10x296 aktiivimetriä 20 m kaivoväleillä. Mitoitus on energian mukaan, ja maasta saatava energia ja teho ovat silloin 96 kWh/m ja 25 W/m. Tuloksesta on huomioitava, että oletukset ovat hyvän geoenergiapotentiaalin omaavilla ominaisuuksilla. Vastaavaa energiansaantia ei voida taata tuntematta kallion ominaisuuksia, ja mitoituksessa on siten käytettävä kohdekohtaista harkintaa.



**Kuva 11. Kaivokentän simulointiesimerkki (EED 4.20, muokattu)**

Kuvasta nähdään, kuinka kallion lämpötila laskee ajan kuluessa vuosisykleittäin ja lähestyy tasapainotilaa.

### 3.2 Kulutuskohteet

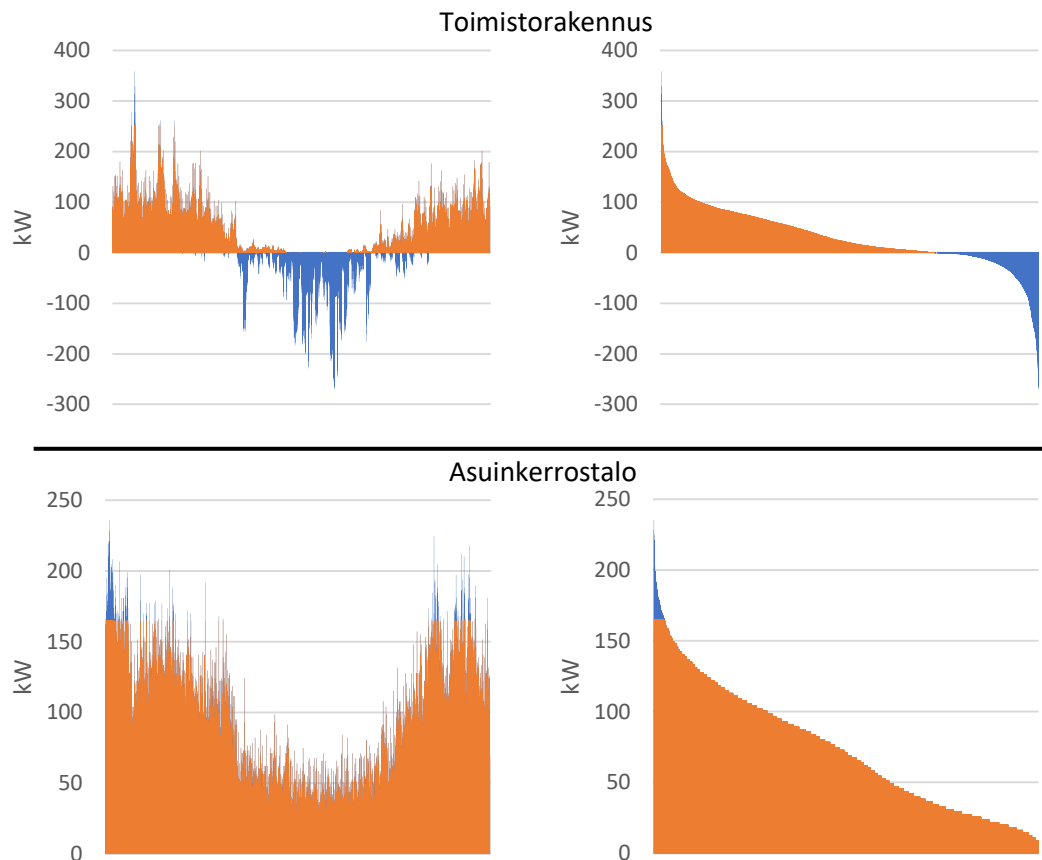
Rakennuksen lämpöenergian tarve määräytyy sen toiminnan ja ulkolämpötilan mukaan. Uudisrakentamisessa energiankulutukseen arvioidaan monia asioita, kuten eristystä, ikkunapinta-alaa ja niihin osuvaa auringon valon määrää, lämmitettävää tilavuutta, käyttöveden määrää ja toimilaitteita. Saneerauksessa energiankulutuksesta on tieto valmiina.

Eri kohteissa on hyvin erilaisia kulutusprofiileja. Geoenergiajärjestelmän etuna on sen muokattavuus ja hyvä mukautuvuus energian siirtoon esimerkiksi rakennuksen eri osien välillä. Muokattavuudella tarkoitetaan esimerkiksi kaivokentän runkolinjoihin tehtäviä kytkentävarauksia porausvaiheessa, tulevaisuudessa tehtäviä lisäporauksia varten. Kiinteistön eri osien välisen energiansiirron lisäksi maalämpöpumpulla voidaan tuottaa jäähdytystehoa, ja jäähdytysenergia voidaan varastoida kaivokenttään, eikä lauhduttaa ulkoilmaan. Tällä tavoin kallioon varastoituva lämpöenergia lisää lämmityskaudella sieltä kestävästi saatavan energian määrää taselaskennassa.

Palvelukohteissa voi olla tarvetta jatkuvalle jäähdytykselle ja samanaikaiselle lämmitykselle. Näitä kohteita ovat esimerkiksi ostoskeskukset ja sairaalat. Kuvassa 12 on esitetty asuinkerrostalon ja toimistorakennuksen esimerkilliset tuntikohtaiset kulutuskäyrät, sekä niistä muokatut pysyvyyskäyrät. Kuvaajien vaaka-akselilla on kaikki vuoden tunnit. Py-



syvyyskäyrässä kulutustunnit on järjestetty tehon mukaan suuruusjärjestyksessä. Kuvassa on esitetty myös 70% osatehoisen maalämpöpumpun osuus vaadittavasta energiantuotannosta oranssilla, ja lisäenergian tarve sinisellä. Toimistokohteen jäähdytystarve on esitetty myös sinisellä. Jäähdytysenergia voidaan ajaa kaivokenttään, jolloin se lämmittää kaivokenttää talvea varten. Kallion energiataseen mukaan talven aikana voidaan ottaa siten suhteessa enemmän energiaa, mikä tarkoittaa pienempiä kustannuksia energiakaivokentän kohdalla. Jäähdytys voidaan joissain tapauksissa toteuttaa pelkän kiertopumpun kustannuksilla.



**Kuva 12. Esimerkkikohteiden kulutusprofiilit (vasen) ja pysyvyyskäyrät (oikea)**

Kuvasta yllä nähdään, että kulutusprofiili vaikuttaa merkittävästi geoenergiajärjestelmän toimivuuteen. Toimistokohteessa huipputehon piikki on keskitehoon nähden suurempi ja siksi samalla osatehoisuudella siinä katetaan suurempi osuus vaaditusta kokonaisenergiasta. Samaan aikaan kesäkuukausina asuinkerrostalossa on jatkuvasti lämmityskuormaa käyttöveden suuremman osuuden takia.

### 3.3 Geoenergian mahdollisuudet ja haasteet

Geoenergiajärjestelmä sopeutuu moneen, mutta vaatii joissain tapauksissa rinnalleen toisen lämmitystavan huipputehoa varten. Sen kannattavuuteen ja tekniseen toimivuuteen vaikuttaa niin moni tekijä, että jokainen kohde on arvioitava erikseen ja yhtenäistä yksinkertaista ohjetta on vaikea esittää. Joissain tapauksissa rakennuksen tontilla ei ole riittävästi tilaa riittävälle määrälle energiakaivoja.

Lämpöpumppujen vaikutuksia sähköverkolle ja energiayhtiön toimintamalliin on tarkasteltu Jussi Tuunasen [5] ja Esa Jokelan [3] diplomitöissä. Lämpöpumppujen kokonaisvaikutus sähköverkon energiankulutukseen ja siten liiketoiminnan määrään ovat Tuunasen tarkastelun mukaan netto negatiiviset. Tämä johtuu siitä, että lämpöpumput korvasivat tutkimuksen mukaan eniten sähkölämmitteisiä kohteita, mikä pienentää sähköenergiankulutusta. Hyötysuhteen takia voidaan jokaista sähkölämmityskohdetta kohti korvata enemmän öljylämmityskohteita. Verkkokapasiteetin kannalta merkityksellisimpiä ovat on/off-pumppujen suuret käynnistysvirrat. Näitä vaikutuksia on kuitenkin minimoitu nykyaikaisten lämpöpumppujen pehmokäynnistimillä. Myös invertterilämpöpumput yleistyvät, jolloin vastaavia tehopiikkejä ei synny, kun lämpöpumppua ajetaan jatkuvalla osateholla. Yleisesti ottaen vaikutukset sähköverkon toimintaan oletetaan tutkimuksessa pieniksi, kun sähköliittymä päivitetään asianmukaiseksi pumpun asennuksen yhteydessä.

Jokela taas esittää lämpöpumppujärjestelmien vapauttavan tehontarvetta kaukolämpöverkosta muualle ja pienentää investointikustannuksia. Kaukolämpöverkon jäähtymän aleneminen nähtiin uhkana, mutta hybridijärjestelmät myös mahdollisuutena. Lämpöpumppukohteissa mukana asennettavat varaajat tasaavat kulutuspiikkejä. Energiayhtiöille huipputehontarve korostuu ja murros voi edellyttää hinnoittelumuutoksia ja muodostaa muita haasteita.

Yksi kaukolämmön ja sähköverkon suurimpia ongelmia tulevaisuudessa on todennäköisesti vanhan verkkomallin mukaisen säätövoiman puuttuminen. Yhteistuotanto laskeaan huonosti säätäväksi, sillä lämmön tarve ja sähkön tarve ajoittuvat yleensä päällekkäin. Tulevaisuudessa korostuukin kysynnän jousto tuotannon sijaan. Aiheesta on tehty Energiateollisuus ry:n koordinoima tutkimus, jonka loppuraportti julkaistiin 2015. [40] Lämpöpumput ilman kysyntäjoustoa aiheuttavat sähkötehon tarvetta, joka osatehoisena korostuu kylmimpinä vuoden aikoina. Kysyntäjoustolla rakennusten ja geoenergiajärjestelmien lämpövaraajien jousto voidaan käyttää osana kysyntäjoustoa, samoin kuin varaavia sähkölämmitteisiä kiinteistöjä ja sähkösaunoja. Raportissa kaikkien lämpöpumppujen yhteenlasketun sähkötehon arvioitiin olevan 1050 MW, josta maalämpöpumppujen osuus oli 250 MW. Vertailuna pientalojen, rivitalojen ja loma asuntojen yhteenlaskettu

sähkölämmityslaitteiden kokonaistehon arvioitiin olevan noin 6500 MW, sähkösaunojen kapasiteetti on 9000 MW, aamun tunneille painottuvan auton lämmitystolppien käyttämä sähköteho pahimmillaan 1000 MW. Raportissa myös simuloitiin tilanne, jossa pientalo alueella vaihdettiin kaikki öljylämmitys maalämpöpumppuihin. Simuloinnista todettiin, että sähköverkon huipputeho kasvoi 16,8%. Simuloinnin yhteenvedossa todettiin: ”Ulko- lämpötila huomioiden on kuitenkin todennäköistä, että vain pari muuntajaa jouduttaisiin vaihtamaan suurempaan ylikuormitusriskin takia”. [40]

Kysyntäjouston siirtyminen on taloudellinen etu kuluttajalle ja kansantaloudelle. Sähkö- lämmitteisiä pientalouksia on valtavasti, mutta sähköohjausta ei ole asennettu. Näissä tapauksissa geoenergiaan vaihtaminen mahdollistaa kysyntäjouston ja alentaa sähkön- kulutusta sekä huipputehon tarvetta. Suurimmat piikit pientalojen sähkönkulutuksessa ovat lämmitysjärjestelmästä riippumatta sähkösauna ja -hella. Lämmityksestä ja muusta toiminnasta johtuva sähkötehon vaihtelu on suhteellisen pientä. Omakotitalossa sähkö- tehot ovat suuruusluokkaa: maalämpöpumppu vastukset mukaan lukien 9 kW, kiuas 10 kW, liesi 8,5 kW. Rivitaloissa tilanne on sama, mutta lämmitysjärjestelmissä on enem- män öljy- ja kaukolämpöä, joista geoenergiaan siirtyminen lisää sähkön kulutusta. [40] Huipputehon kasvamista voi estää yksinkertaisesti maalämpöpumpun tehovahti ohjauk- sella. Lämmitysjärjestelmä voi toimia puskurivaraajalla saunomisen ajan. Kysyntäjous- ton potentiaalin kasvattamiseksi geoenergiajärjestelmiin tulisi asentaa tarpeeksi suuret varaajat.

Raportin mukaan kaiken öljylämmityksen poistaminen vaatisi noin 600-1000 MW lisää sähkötehoa. Olkiluoto 3 -ydinreaktorin sähköteho on valmistuessaan 1600 MW ja tuuli- voimakapasiteetti kasvoi vuonna 2019 ilman tariffeja 12%, joka oli yli 200 MW. Sähkön kulutuspiikin kannalta ilmalämpöpumput ovat merkittävämpi tekijä kuin maalämpöpum- put, sillä niiden asennettu sähkötehokapasiteetti on suurempi ja hyötysuhde huonompi etenkin kovilla pakkasilla.

Geoenergia on hyvän hyötysuhteensa ja jäähdytysmahdollisuuksien vuoksi erittäin mu- kautuvainen hybridijärjestelmiin. Tulevaisuuden älykkäämmissä energiajärjestelmissä uusiutuvan energian vaihtelevan tuotannon ongelmia voidaan ratkaista ohjaamalla ja va- rastoimalla energiavirtoja edullisimman tuotannon mukaan ja liittämällä pientuotanto osaksi julkista verkkoa. [41] Sähköautot ja lämpöpumput nähdään mahdollisena sähkö- verkon säätö- ja varastointi kapasiteettina vaihtelevan tuulivoiman tueksi. [21] Lämpö- pumput osana lämmityksen sähköistymistä korvaavat tulevaisuudessa biopolttoaineiden riittämättömyyttä vähäpäästöskenaarioissa. Suomeen on suunnitteilla merkittävästi bio- polttoaineiden tuotanto- ja jalostuslaitoksia ja samanaikaisesti sähkön- ja lämmöntuo-

tanto siirtyy pois fossiilisista. [27] Myös poistoilmalämpöpumput ovat kasvattaneet suosiotaan hybridijärjestelmissä asuinkerrostaloissa. Poistoilmalämpöpumpuilla ei voida tuottaa kaikkea rakennuksen vaatimaa lämpötehoa.

Parhaassa tapauksessa lämpöpumput, ja erityisesti geoenergia lisää kuluttajille monipuolisempia lämmitysvaihtoehtoja, mahdollistaa kahdensuuntaista lämpökauppaa ja energiajärjestelmän joustoa, sekä vähentää lämmityksestä aiheutuvia päästöjä ja lisää energiaomavaraisuutta. Kallioperän lisäksi järjestelmään voidaan sovittaa poistoilman lämmöntalteenottoa ja aurinkosähköä tai -keräimiä.

Havaintona geoenergiajärjestelmän rakentamisen energiankulutuksesta ja päästöistä on otettava huomioon maalämpöpumppujen korkea kotimaisuusaste, pitkä käyttöikä ja suuri vähäpäästöinen energiantuotantomäärä. Kaivokentän poraamiseen kuluu poravaunun, kompressorin ja kuljetus ajoneuvojen polttoaineena kevyttä polttoöljyä ja dieselöljyä. Dieselin energiatiheys on 9,9 kWh/l ja kuvan 11 esimerkin maasta saatavan energia 96 kWh/m vuodessa. Järjestelmä tuottaa nettoenergiaa muutamassa kuukaudessa, ja kaivokentän käyttöikä on kymmeniä vuosia.

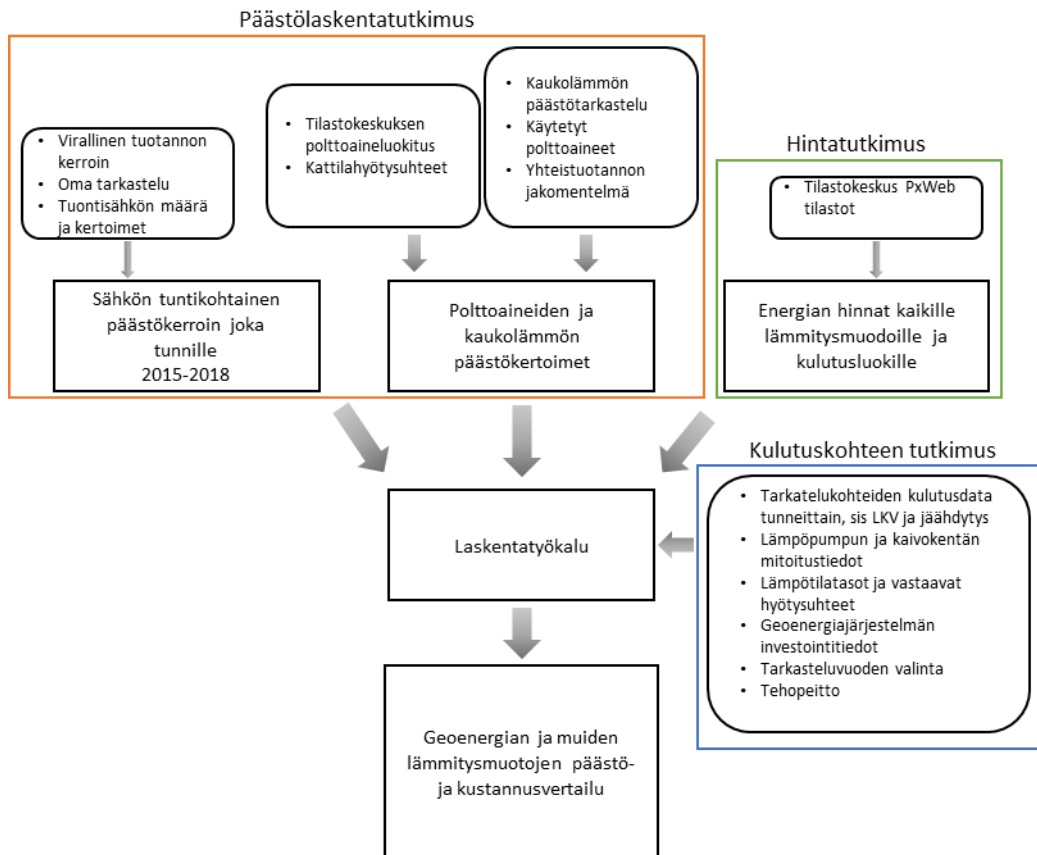
Kylmäainetekniikka kehittyy edelleen jatkuvasti. Samaan aikaan kylmäaineiden ympäristövaikutukset laskevat säädöksien vaikutuksesta. Monet kehitystekniikoista ovat kuitenkin teollisen mittakaavan järjestelmiin, jotka toimivat jatkuvammin ja tasaisemmalla kuormalla. Tilalämmityksen vaihtelevuuden takia lämpöpumpputekniikka on toistaiseksi ollut yksinkertaisempaa, sillä laitteiden huoltovarmuus on tärkeä osa järjestelmän kilpailukykyä, ja lisäinvestoinneilla ei saataisi teollista mittakaavaa vastaavia hyötyjä. Kylmäainekomprimoinnin teknologiakehitystä on selvitetty Chasik et al:in kylmätekniikkajulkaisussa. [42]

## 4. TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO

Tehdyn tutkimuksen tarkoituksena oli tutkia geoenergiajärjestelmän päästövähennyspotentiaalia tarkastelemalla tuntikohtaista lämmitysenergiakulutusta ja tarkastelemalla geoenergiajärjestelmän vaikutuksia todellisen tuntikohtaisen sähköntuotannon datan mukaan. Syy tutkimukselle oli tarkentaa lämpöpumpun kuluttaman sähköön päästöjä. Kun lämpöenergiaa tarvitaan paljon, myös sähköä tarvitaan paljon, ja sähköverkon huippukuormaa tuotetaan edelleen polttamalla fossiilisia polttoaineita. Kulutus- ja sähköverkko-datan keskiarvottaminen poistaa kulutuspiikkien vaikutuksia. Todellisia päästöjä ja kuluksia verrataan muihin lämmitysmuotoihin, ja tehonpeittoa optimoidaan. Tarkastelu on Suomen koko sähköverkon tasolla, jotta päästövähennyspotentiaali saadaan selville yleisesti, mutta laskentatyökaluun voidaan ottaa huomioon alueelliset erot manuaalisesti. Erityisesti kaukolämmön päästöt ja energiahinta on hyvin alue riippuvaista. Myös sähkösopimuksen päästö- ja kustannusvaikutus voidaan huomioida työkalussa. Huomioitavaa on myös, että lämpöpumpun hyötysuhde on alhaisempi, kun lämpötehoa vaaditaan paljon. Tässä luvussa selvitetään tutkimusmenetelmät ja laskennan perusta, sekä syyt niiden valinnalle.

### 4.1 Tutkimusvaiheet

Tutkimuksen kannalta oleelliset tutkimukset olivat sähköverkon tuntikohtaisen päästökertoimen ja verkon kokonaiskulutuksen selvittäminen. Data vaadittiin sähköntuotannon päästöjen ja lämpöpumppujen verkkovaikutusten määrittämiseksi. Samalla saadaan selville lämpöpumppujen nykytilanteen ja tulevaisuuden vaikutusten suuruusluokka muuhun energiankulutukseen verrattuna. Seuraavaksi oli selvitettävä tarkastelukohteiden lämpöenergian kulutukset, sekä sähköön, öljyn, maakaasun ja kaukolämmön kuluttajahinnat ja päästöt lämmitysmuotojen vertailua varten. Taustatutkimuksen jälkeen suoritettiin laskentatyökalun rakentaminen ja laskentaan vaikuttavien järjestelmätietojen syöttö. Kuvassa 13 on esitetty tutkimuksen vaiheet vuokaaviona. Seuraavaksi kuvataan tutkimusvaiheita ja laskentaoletuksia yksityiskohtaisemmin.



**Kuva 13. Tutkimusvaiheiden vuokaavio**

#### 4.1.1 Sähköverkkotutkimus

Laskennan tarkentamiseksi sähköntuotannon tuntiteho, lähteet ja polttoaineet täytyi selvittää. Tutkimukseen käytettiin Energiategollisuus ry:n, Finngrid Oyj:n ja Nordpoolin sähköntuotanto, ja kulutusdataa vuodelta 2018. Tietojen erotuksesta voitiin nähdä myös nettotuonnin tuntiteho. Tuntikohtaiset datat vastaavat hyvin lähelle toisiaan. Vertailun avulla varmistettiin lähteiden luotettavuus. Tuotannon ja kulutuksen lisäksi Finngridiltä saatiin tuontisähkön tuntidataa tuontimaittain, sekä kaukolämpölaitosten yhteistuotannon kokonaisteho 3 minuutin keskitehoina, joka keskiarvotettiin tunneittain koko vuodelle 2018.

Lisäksi useiden maiden kaupallista sähköverkon päästötutkimusta reaaliajassa toimittaa Electricity Map AVI. Electricity Map -palvelun vuoden 2018 datassa on sähköntuotannon teho tunneittain voimalaitostyyppin mukaan, sekä perinteisissä lämpövoimalaitoksissa polttoaineen mukaan. Polttoaineet on erotettu hiili-, maakaasu-, öljy- ja biopolttoaineisiin. Turve kuuluu datassa hiilivoimaan. Päästökertoimet ovat IPCC 2014 raportista, ja kaikki yhteistuotanto lasketaan lauhdevoimana. Tästä syystä datasta poimittiin vain tuntikohtainen tuotantodata, jotta polttoaineiden osuudet saatiin mukaan laskennan varmentamiseen.

Laskennan tarkentamiseksi vuoden 2018 datoista valittiin Energiateollisuus ry:n tunti-data. Datassa on eroteltu ydinvoima, tuulivoima, vesivoima, aurinkovoima, teollisuusvoima, kaukolämpö yhteistuotanto, sekä erillinen lauhdevoima. Lisäksi eroteltiin sähkön tuonti, -vienti ja kokonaiskulutus. Electricity Map Avi:n polttoainedataa käytettiin yhteistuotannon ja lauhdevoiman päästöjen laskemiseksi. Teollisuusvoiman sähkön osuus oletettiin samassa suhteessa kuin kaukolämmön yhteistuotannolla. Polttoaineiden käytösuhteesta laskettiin ominaispäästökerroin yhteistuotantolaitoksille. Päästöt jaettiin tästä hyödynjakomenetelmällä sähkölle. Sähköntuotannosta aiheutuneet päästöt jaettiin tuotetulla sähköenergialla, ja päästökertoimeksi saatiin 118,8 g/kWh. Tarkastelu suoritettiin tuntidatan luotettavuuden arvioinniksi ja tuntikohtaisen laskentamallin kehityksen pohjaksi.

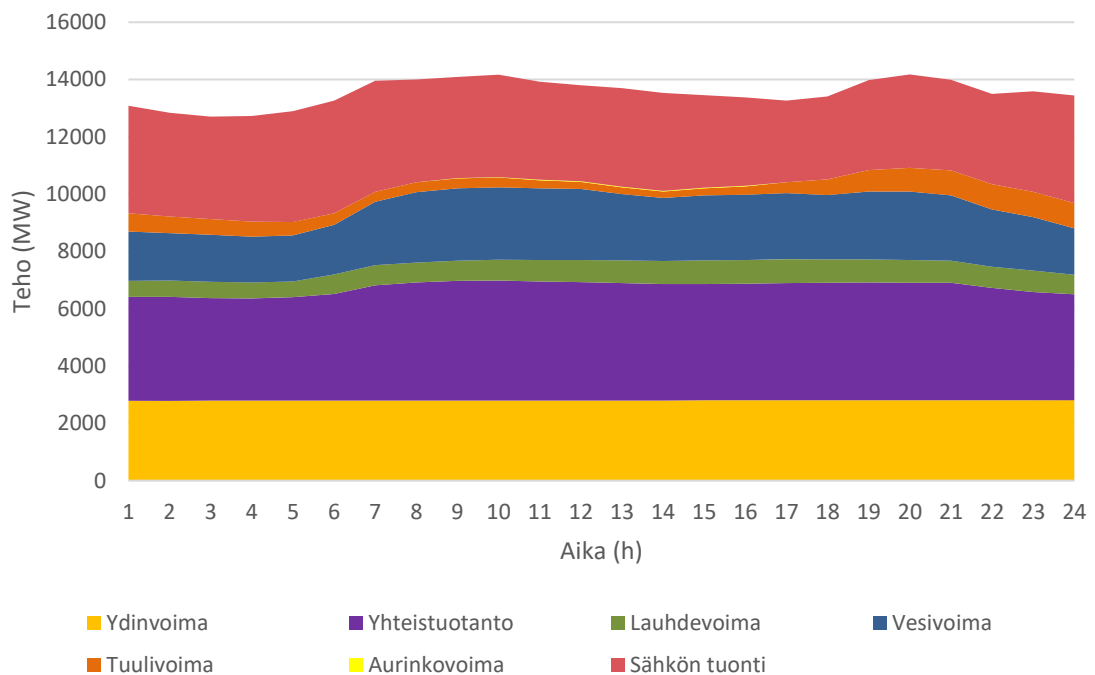
Laskuri luotiin tarkastelemaan vuosia 2015-2018 ja viralliset raportoidut tuntikohtaiset päästökertoimet saatiin Energiateollisuus ry:ltä. [43] Kulutetun sähkön todelliset päästöt koostuvat sekä Suomessa tuotetusta sähköstä, että tuontisähkön päästöistä. Tuontosähkön kertoimella lasketut päästöt eivät vastaa todellisuutta globaalisti. Siksi laskentaan otettiin myös sähkön nettotuonti. Tuontisähkön ominaispäästökertoimia ei tutkittu tunneittain, mutta niiden vaikutus huomioidaan laskentamallissa maakohtaisen ominaispäästökertoimien avulla. Tuontisähkö tulee Suomeen pääasiassa Ruotsista ja Venäjältä. Osa tulee myös suoraan Norjasta, sekä Virosta. Suomesta viedään sähköä Viroon vuodessa yhteensä moninkertainen määrä Viron tuontiin verrattuna. Laskurissa vientisähköä ei oteta huomioon negatiivisena. Maiden eri sähköverkon sektorien kertoimia ei otettu huomioon. Norjan sähkö tulee lähes pelkästään vesivoimasta. Ruotsissa on 9,1 GW ydinvoimakapasiteettia, sekä 15,9 GW vesivoimakapasiteettia ja paljon tuulivoimaa. Virossa on Euroopan Unionin suurin ominaispäästökerroin liuskeöljyn suuren käytön takia, mutta tilanne on muuttumassa päästökaupan vaikutuksesta. Venäjällä on ydinvoimaa ja paljon hiili- ja maakaasuvoimaa. Venäjällä ei ole toistaiseksi päästökauppaa. Venäjän oman päästökaupan on määrä aloittaa toimintansa 2025 ja integroitua muihin kansainvälisesti toimiviin päästökauppajärjestelmiin. [45]

Laskennassa käytetyt kertoimet on esitetty taulukossa 4. Ruotsin ja Viron päästökerotomien lähteenä käytettiin Euroopan ympäristökeskusta (EEA) [46] ja Norjan lähteenä Kansainvälistä energiajärjestöä (IEA) [47]. Venäjän päästökerrointa ei julkaista IEA:n tilastoissa. Lähteenä käytettiin kansainvälisen Climate Transparency -järjestön G20 maiden raporttia Venäjästä. [48]

**Taulukko 4. Tuontisähkön ominaispäästökertoimet. (EEA, IEA, Climate Transparency, muokattu)**

	Ruotsi	Norja	Viro	Venäjä	
Sähkön ominaispäästökerroin	13,3	14,4	818,9	335	g/kWh

Tarkastellaan seuraavaksi vuoden 2018 sähkön kulutushuippua. Kuvassa 14 on esitetty vuoden 2018 huippukulutusvuorokauden sähkön tuotanto energialähteittäin. Kuvasta nähdään, että nopeat muutokset kulutuksessa katetaan tuotannossa nostamalla yhteistuotantoa, vesivoimaa ja tuontisähkön tehoa. Yhteistuotannon nousu osuu myös kaukolämpöenergian kysynnän piikin kanssa samaan aikaan. Lauhdevoima ja osa yhteistuotannosta on tehty fossiilisilla polttoaineilla. Lisäksi tuontisähkön päästöt riippuvat sähkön alkuperämaasta. Tulevaisuudessa ydinvoiman ja tuulivoiman osuus tulevat kasvamaan, ja yhteistuotannon energialähteet siirtyvät kohti hiilineutraaliutta.



**Kuva 14. Vuoden 2018 sähkön huippukulutus 28.2. energialähteittäin**

#### 4.1.2 Kaukolämpö ja polttoainetutkimus

Geoenergiajärjestelmän vertailu muihin lämmitysmuotoihin vaatii niiden päästökertoimien ja kustannusten tarkastelua. Polttoaineiden päästökertoimet energiayksikköä kohti on kerrottu aiemmin taulukossa 3. Niiden lisäksi laskennassa käytetään kaasu- ja öljylämmityksessä oletuksena 90% kattilakyötysuhdetta. Polttoaineiden hinnat otettiin Tilas-



tokeskuksen PxWeb-tietokannasta. Kevyen polttoöljyn hinta vaihtelee maailman markkinatilanteen mukaan, mutta on päästötarkasteluvuosina ollut 80-100 €/MWh välissä. Laskennassa käytetään keskiarvoista hintaa 90 €/MWh. Kaasun hinnat otettiin Suomen Kaasuenergia Oy:n taloyhtiö ja pienteollisuus kohteiden lämmityskäytön perushinnastosta ilman fossiilisten polttoaineiden maailman hintoihin sidottuja indeksimuutoksia 1.1.2020. Luvuksi saatiin 92,848 €/MWh sisältäen verot ja siirtomaksut. Hintaan lisätään perusmaksu 20 €/kk ja tehomaksu 2 €/kW/kk. Kustannuslaskennassa kaasun ja öljyn energiakustannuksen nousuksi oletetaan 4% vuosittain, mutta hinta vaihtelee maailman tilanteen mukaan suuresti.

Kaukolämmön päästötarkastelu suoritettiin tarkastelemalla yhteistuotannossa käytettyjen polttoaineiden päästöjä eri jakomenetelmien kannalta. Viralliset päästökertoimet vuosille 2015-2017 esitettiin taulukossa 2 ja vuosille 2018-2019 luvussa 2.1.2. Päästökertoimien tarkastelua varten yhteistuotantoon käytettyjä polttoaineita tarkasteltiin tarkemmin. Tilastokeskuksen Energiavuosi 2018 – taulukkopalvelun taulukossa 4.2 ”kaukolämmön tuotannon polttoainekulutus” on kaukolämmön vuosittaiset ominaispäästökertoimet laskettu jakamalla hyödynjakomenetelmällä lasketut kaukolämmön kokonaispäästöt myydyllä energiamäärällä. Hyödynjakomenetelmällä laskettuna käytettyä polttoaine-energiaa – ja siten niistä peräisin olevia päästöjä – on silloin syntynyt vähemmän kuin myytyä lämpöenergiaa. Tämä tarkoittaa, että laskennallinen hyötysuhde kaukolämmön tuotannossa käytetyn polttoaine-energian mukaan on noin 112%.

Laskemalla päästökertoimet jakamalla päästöt poltetun kokonaisenergian mukaan, saadaan vuosien 2015-2017 kaukolämmön päästökertoimiksi 160g/kWh, 170 g/kWh ja 172 g/kWh. Nämä luvut asettuvat siten virallisten energia- ja hyödynjakomenetelmien välille. Yhteistuotannon kokonaispäästöt raportoidaan päästökaupasektorin energiasektorille ja vastaavat taulukossa todellisuutta, mutta ominaispäästökerroinlaskennassa loppukäytön päästöt vääristyvät käyttämällä sähkölle- ja kaukolämmölle kummallekin erikseen suotuisampaa päästökertoimen laskentamenetelmää. Tässä työssä laskennassa käytetään virallisia hyödynjakomenetelmällä ilmoitettuja päästökertoimia sekä sähkölle, että kaukolämmölle.

Kaukolämmön hinnat ovat valittavissa vuoden 2018 hintatietojen mukaan, jossa on samat kulutusryhmät kuin kuvassa 5. Hintatiedossa on myös vaihtoehto valita hinta lämpöyhtiön mukaan. Tiedot haetaan automaattisesti Energiateollisuus ry:n kaukolämmön hinta 2018 – tilastosta, joka on liitetty laskentapohjan Excel-tiedoston välilehdelle. Tämän työn laskennassa kustannuksena käytetään asiakaslukumäärällä painotettua keskiarvoa.

## 4.2 Laskentatyökalun ominaisuudet ja oletukset

Seuraavaksi esitellään laskentatyökalun rakentamista ja siinä käytettyjä oletuksia. Laskentaa yksinkertaistettiin saatavilla olevan datan vuoksi. Todellista tilannetta varten tarvittaisiin suoraa dataa asennettujen lämpöpumppujen todellisesta kulutuksesta, hyötysuhteesta ja keruunesteen lämpötilasta.

### 4.2.1 Energia ja päästöt

Laskentatyökaluun rakennettiin runko, johon syötetään kulutusdata tunneittain. Datassa saa olla tilalämmitys, käyttöveden lämmitys, sekä jäähdytys erikseen. Syöttäminen tapahtuu manuaalisesti. Siten lämmitys ja jäähdytystehoja voidaan tarkastella yksityiskohtaisesti. Kulutusdatalle valitaan valikosta tarkasteluvuosi, jotta kulutus ja sähködata vastaavat toisiaan. Laskuri ottaa kulutusdatasta automaattisen kulutushuipun ja mitoittaa lämpöpumpun annetun osatehon mukaan, tai lämpöpumpputehon voi syöttää suoraan. Suoraan syötetty tieto ohittaa tehopeiton valinnan. Laskennassa oletetaan, että saman tunnin sisällä pumppu tekee ensisijaisesti lämmintä käyttövettä, ja lopulla kapasiteetillaan tilalämmitystä. Tämä valittiin, sillä todellisuudessa tilalämmityksessä on enemmän suhteellista puskurivarausta; ihminen huomaa helpommin, ettei hanasta tule kuumaa vettä, kuin että huoneiston lämpötila laskee  $1^{\circ}\text{C}$ . Tämä oletus vastaa todellista lämpöpumppujen ohjausta. Laskennassa ei oteta huomioon varaajilla saatavaa tasoitusta ja joustoa käyttöveden tehontarpeeseen. Laskuri laskee erikseen maasta saatavan lämpöpumppuenergian kaivokenttätarkastelua varten. Jäähdytys teho vähennetään suoraan maatehon tarpeesta. Huipputehotuntien aikana lämpöpumpputehon ylittävä teho laskeetaan tehtäväksi sähkövastuksella. Laskurissa ei ole mahdollista syöttää varaajia tasamaan kulutuspiikkejä, vaan kaikki tehopiikkien pehmennys on tehtävä kulutusdataa analysoimalla ja muokkaamalla sitä manuaalisesti. Kaikki kulutettu sähköenergia lasketaan, ja tunnin sähköenergia kerrotaan jokaisen tunnin ominaispäästökertoimella. Täten saadaan laskettua järjestelmän päästöt tunneittain. Uudiskohteen kulutusarvot normaali vuoden lämpötilajakauman mukaan voidaan laskea vuosien 2015-2018 keskiarvoisella tuntikohtaisella päästökertoimella. Keskiarvotettu tuntikohtainen päästökerroinluku ei vastaa kuitenkaan normaalivuoden mukaisia piikkejä, joten päästöt jäävät olettavasti pienemmäksi kuin todellisena vuonna.

Lämpöpumpun hyötysuhde syötetään joko SPF- ja LKV-SPF-lukuna, jolloin se on vakio läpi koko vuoden. Laskennassa otetaan siten huomioon käyttöveden korkeamman lämpötilatason vaikutus hyötysuhteeseen. Hyötysuhde voidaan myös syöttää kuukausittain. Tämän avulla mallinnetaan tarkemmin lämmitysjärjestelmän lämmityskierron lämpötilaa.

Laskentamallilla voidaan siis tarkastella eri lämmityskiertojen vaikutusta. Lämpöpumpujen hyötysuhteita käytetään tarkastelussa vain standardien mukaisten 0/35°C ja 0/55°C lämmityskiertojen hyötysuhteilla, sillä nämä ovat yleisimmin käytössä olevat järjestelmät.

Lopulta laskuri ilmoittaa huipputehon, lämmitysenergian kokonaismäärän, sähkön kulutuksen, lisäsähkön määrän, lämpöpumpun energianpeiton, järjestelmän kokonaishyötysuhteen ja kokonaispäästöt, sekä ominaispäästökertoimen.

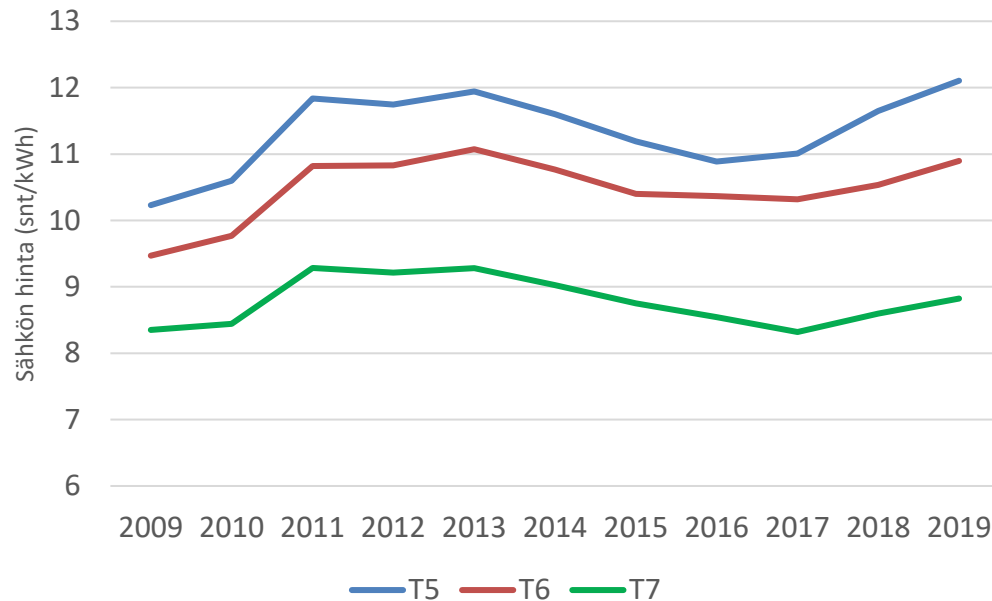
Muiden lämmityslähteiden päästöt lasketaan täysitehoisen mitoituksen mukaisesti. Polttoaineiden päästökertoimet ovat taulukon 3 mukaiset. Kaukolämmön päästökertoimen valintaan käytetään valikkoa, josta valitaan kaukolämmön laskentamenetelmä ja tarkasteluvuosi. Kaukolämmön päästökerroin voidaan myös syöttää itse, tai valita valikosta lämpöyhtiöittäin (laskettavissa 2018 kaukolämmön tuotannon energialähteiden mukaan, yhtiöittäin, ET ry). Laskurissa ei pystytä ottamaan huomioon myös kaukolämpöä koskevaa päästökertoimen suurempaa lukua kulutushuipuissa. Sähkön ja lämmön tuotannon huiput asettuvat samoihin kohtiin, ja erillisten huipputeho-lämpölaitosten polttoaineet ovat usein öljyä tai maakaasua. Päästökertoimesta ei kuitenkaan ole olemassa tunti-dataa, ja kaukolämmön tuotantoa tulisi tarkastella erillisesti lämmitysyhtiön ja lämmitysverkon mukaan. Laskuri antaa myös vertailukohteiden päästöt ja valitun geoenergiajärjestelmän päästövähennyksen.

#### **4.2.2 Kustannukset**

Päästöjen lisäksi laskuriin rakennettiin energian kustannusvertailu. Jokaisen perinteisen lämmitysjärjestelmän energiakustannus on valittavissa joko luvussa 4.1.2 esitetyn keskiarvoisen lähteen mukaan, tai syötettävissä manuaalisesti kohdekohtaisempaa vertailua varten.

Geoenergiajärjestelmän käyttökustannukset muodostuvat järjestelmän kuluttamasta sähköstä. Sähkön hinta on laskentatyökalussa valittavissa samaan tapaan kuin muissa lämmitysmuodoissa. Hinnossa on lisäksi vaihtoehto tarkasteluvuoden valinnalle. Hinnat on otettu Tilastokeskuksen PxWeb-tietokannasta kuluttajaryhmittäin [49] ja ne haetaan valikkoautomaatilla laskentatyökalun erilliseltä välilehdeltä. Sähkön hinta sisältää sähkön energiamaksun, siirtomaksun ja verot. Sähkön hinnat ja kuluttajaprofiilit on esitetty kuvassa 15. Kuluttajaluokat ovat yritys- ja yhteisöasiakkaita. T5-luokassa vuosikulutus on alle 20 MWh, T6-luokassa 20-499 MWh ja T7-luokassa 500-1999 MWh. Kaikki tarkastelukohteet ovat mitoitukseltaan kuluttajaluokkaa T6, ja laskennassa käytetty sähkön hinta on kuvassa esitetty vuoden 2018 keskiarvo 105,35 €/MWh eli 10,535 snt/kWh.

Sähkön hinnan nousu tarkasteluvuosina 2015-2018 on ollut maltillista, mutta vuonna 2019 hinnat nousivat 2-4%. Laskennassa käytetään 2% vuosikustannuksen nousua.



**Kuva 15. Sähkön kuluttajahinnat vuosina 2009-2019.**

Koska laskuri pääasiassa tarkastelee energiasaneerauskohteita, on varsinkin maalämpöjärjestelmän investointikustannukset otettava huomioon kannattavuutta arvioidessa. Geoenergian investointikustannuksia voidaan arvioida kahdessa pääosuudessa: energiakaivokentän rakennuskustannukset, sekä maalämpöpumppu ja sen asennuskustannukset.

Kaivokentän kustannuksien syöttöä varten laskurissa on työkalu, joka tarkistaa laskurin tuntikohtaisesta kallioperästä otetusta huipputehosta ja vuosittaisesta kokonaisenergiasta vaadittavat porausmetrit. Huipputeholle ja kokonaisenergialle syötetään ylärajat kohdekohtaisesti. Tällä voidaan ottaa huomioon kohteen kulutusominaisuudet ja sijainnista johtuvat kallioperän ominaisuudet. Laskuri ilmoittaa vaadittavat porausmetrit rajoittavan tekijän mukaan. Porausmetreille syötetään hinta €/m, joka käsittää koko energiakaivokentän kustannuksen. Kustannus vaihtelee kohteen mukaan, sillä kustannuksiin vaikuttaa sijainti, kaivojen syvyys, maapeitteen paksuus, keruuneste, kollektorikoko, muu putkitus, kaivannon määrä ja laatu sekä monet pienemmät asiat. Energiakaivokentän kustannus skaalautuu tavallisesti sitä kalliimmaksi, mitä suuremmasta kohteesta on kysymys. Tämä johtuu putkikokojen kasvusta, syvempien kaivojen aiheuttamista porauskustannuksista ja kaivojen ottaessa energiaa enemmän samasta kalliomassasta.

Lämpöpumpun asennukseen liittyvät kustannukset riippuvat kohteessa vaadittavista toimenpiteistä, kuten sähköliittymän päivityksestä ja putkiasennusten määrästä, sekä pumppuvalinnasta. Lämpöpumpun ja putkiasennusten kulut noudattavat tavallisempaa

kapasiteetti kustannus suhdetta, jossa lämpöpumpputehon kasvattaminen samassa kohteessa alentaa ominaiskustannusta. Niille syötetään ominaiskustannus €/kW lämpöpumppukapasiteetin mukaan.

Laskuriin voidaan syöttää myös kokonaishinta maalämpöinvestoinnille. Tavallisen tehokapasiteetin kokonaiskustannusluokka on 1800 €/kW mutta voi vaihdella runsaasti kohteen mukaan. Tässä työssä käytetään em. tehokustannusta oletuksena koko geoenergiainvestoinnin kustannusten tarkasteluun.

Kustannustarkastelussa voidaan investointikustannusta arvioida lisäksi tarvittavan rahoituksen avulla pinnallisesti. Rahoitustarkastelussa voidaan syöttää lainasumma, korkokanta ja prosentti osuus, jonka mukaan investoinnin kustannus nostaa kiinteistön jälleenvuontiarvoa. Laskenta suoritetaan nettonykyarvomenetelmällä ja verrataan muihin lämmitysmuotoihin. Todellisuudessa yhtiövästike asuntoyhtiöissä voi laskea heti projektin valmistuttua ja asuntojen hinnat nousevat.

Lisäksi laskuriin on lisätty päästöoikeuden hinta, mikäli päästökauppasektori laajentuisi erillislämmityssektorille. Päästöoikeudelle käytetään Euroopan päästökaupan hintaa, joka on ollut noin 28 €/tCO<sub>2</sub>-ekv vuoden 2019 aikana [50]. Päästöjen hinta lasketaan jokaiselle lämmitysmuodolle ja eritellään käyttökustannuksista. Laskurissa ei oteta kantaa muiden järjestelmien muihin käyttö- tai investointikustannuksiin, kuten öljykattilan huoltokustannuksiin.

### 4.3 Tarkastelukohteiden kuvaus

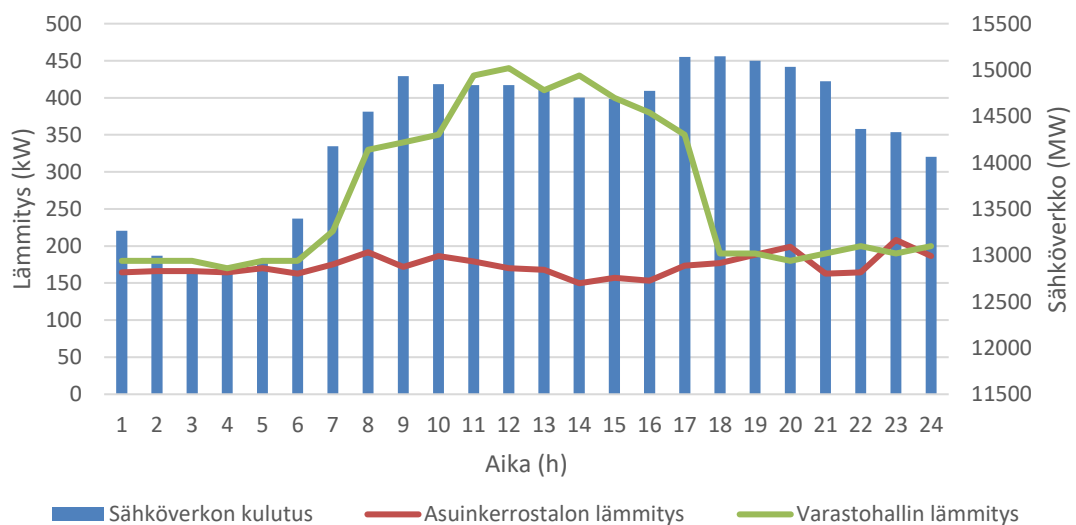
Tässä luvussa esitellään tutkimuksen tarkastelukohteet sekä tiedonhankinta ja analysointi yksityiskohtaisemmin. Tarkoituksena on luoda selvät reunaehdot jokaiseen tutkimuskohteeseen ja selvittää, miten lähtöarvojen muutokset oletettavasti vaikuttavat tuloksiin. Lisäksi esitetään tarkastelukohteiden kustannuslaskennan lähtötiedot 70% osateholla. Luvussa 5 tarkastellaan tarkemmin taloudellisesti kannattavimpien mitoituksien kustannuksia. Kohteiden kulutusdataa ei muuteta, vaan geoenergiajärjestelmän mitoituksen ja päästö- ja kustannuslaskennan oletuksien, sekä lämmitysverkon lämpötilatason – eli järjestelmän hyötysuhteen – vaikutuksia tutkitaan. Lopputuloksena saadaan lisätietoa geoenergian kannattavuudesta ja potentiaalista erilaisissa kohteissa vallitsevissa olosuhteissa ja markkinatilanteissa.

Tuntikohtaista kulutusdataa hankittiin sekä asuinkerrostaloista, että varastohallista. Kohteet sijaitsevat Etelä-Suomessa, mikä tarkoittaa pienempää energiankulutusta, mutta myös parempaa geoenergiapotentiaalia. Kohteiden lämmitystiedot saatiin kaukolämmönvaihtimen tuntikohtaisesta tehosta. Tuntodata oli luovutettu lähtötietoina Rototec

Oy:lle geoenergian kaivokentän simulointia ja mitoitusta varten. Tuntidatasta ei saada käyttöveden osuutta erikseen.

Asuinkerrostalojen tuntidataa saatiin useammasta kerrostalosta vuodelta 2016. Rakennukset on rakennettu vuosina 2011-2013. Data tarkasteltiin ominaislämmitystehon mukaan. Käyttöveden kulutusta varten laskettiin pienimmän kulutuksen viikko heinäkuusta, jolloin kaikki lämmitys kuluu käyttöveteen. Käyttövesikuorma oletetaan siten tasaiseksi läpi vuoden jokaisen viikon, ja kulutus laskettiin ominaiskulutuksena kW/m<sup>2</sup>. Dataa voi siten käyttää erikokoisten ja kulutustyyppisten lämmityksen kustannusten ja päästöjen tarkasteluun skaalaamalla ne lämmitettävien neliöiden mukaan, ja käyttöveden lämmityksen huonompi hyötysuhde voidaan ottaa huomioon. Asuinkerrostalojen kulutusprofiili on tyypillisesti samanlainen. Varastohallista saatiin data vuosilta 2016-2018. Varastohallin kulutusprofiili on hyvin erilainen kuin asuinkerrostalossa. Käyttöveden lämmitystä on paljon vähemmän, ja käyttötilavuutta pidetään viileämmässä lämpötilassa yöt ja viikonloput. Tämä aiheuttaa piikin lämmityksessä arkaamuisin, kun tilat lämmitetään ennen työntekijöiden saapumista. Varastohallin data kuvaa tyypillisemmin palvelurakennuksia. Varastohallin huonekorkeus on merkittävästi suurempi, joten ominaislämmitystä ja keskiarvotusta on tarkasteltava tilavuutta kohti.

Oleellista kulutusdataista on huomata sähköverkon ja lämmitysenergian samanaikaiset piikit. Vuoden huippukulutukset asettuvat lähes täsmälleen samalla tunnille vuosittaisten sähköverkon huippukulutusten kanssa. Data on siis hyvin vertailukelpoista lämmityssähköön päästöjen laskemiseen. Suomen sähköverkon kaikkien aikojen korkein kulutustunti oli 7.1.2016 klo 8:00-9:00. Kuvassa 16 on esitetty asuinkerrostalon, varastohallin ja sähköverkon kulutushuippu saman vuorokauden läpi tunneittain.



**Kuva 16. Kulutushuiput 7.1.2016**

Kuvasta näkee hyvin kulutuspiikin sekä sähkön, että varastokohteen kulutuksessa, kun taas asuinkerrostalo pidetään tasaisesti lämpimänä. Kyseessä oli myös vuoden kylmin vuorokausi, mikä selittää sähköverkon ja lämmitystehon huippujen ajoittumisen samalle vuorokaudelle. Alkuillan korkea sähkönkulutus, selittyy kotitalouksien sähkönkäytöllä, vaikka palvelurakennusten lämmitysteho laskee.

### 4.3.1 Teollisuushalli

Tarkastellaan ensimmäiseksi varastohallia. Halli on rakennettu vuonna 2012, lämmitettävää pinta-ala on 18000 m<sup>2</sup> ja lämmitettävä tilavuus 235000 m<sup>3</sup>. Hallin kulutusdata on 10 kW tarkkuudella. Kolmen vuoden kulutushuippujen keskiarvo oli 350 kW ja kokonaisenergiankulutus noin 500 MWh vuodessa. Kesäkuukausien keskimääräinen energiatarve on noin 100 kWh/vrk ja keskimääräinen tuntiteho on noin 4 kW, mikä tarkoittaa 7% kokonaiskulutuksesta. Laskuriin syötettiin siis 100 kWh/vrk käyttöveden lämmitystä jokaiselle vuorokaudelle heinäkuisen kulutusprofiilin mukaan. Tilalämmitykselle syötettiin loput energiantarpeesta. Kohteen energiankulutukset, huipputehot ja keskiteho on esitetty taulukossa 5.

**Taulukko 5. Varastohallin energiatiedot.**

	Energia (MWh)	Huipputeho (kW)	Keskiarvo (kW)
2016	416,2	440	47
2017	478,8	290	55
2018	597,5	320	68

Vuoden 2016 huippukuorma 440 kW tapahtui kuvassa 16 esitettynä hetkenä ja ulkolämpötila vastasi Etelä-Suomen mitoittavaa ulkolämpötilaa -26°C. Tämä tarkoittaa, että 440 kW voidaan ajatella täystehomitoitusta hyvin tarkasti. Huomattavaa on kuitenkin, että energiakulutus kasvaa joka vuosi, vaikka huipputeho on reilusti suurin vuonna 2016. Varastohallia tutkitaan jokaiselta kulutusvuodelta kolmena CASE:na, osatehoilla 70% ja 80%, sekä täystehona. Osatehojen lisäksi tarkastellaan lämpöpumpun hyötysuhteen vaikutusta. Käyttövedelle oletetaan hyötysuhde  $SCOP_{LKV} = 2,8$ . Liiketilojen lämmitys tapahtuu suurelta osin ilmanvaihdon kautta. Ilmanvaihdon lämpötilatasot ovat 30/50°C tai 30/40°C. Hyötysuhteita tarkastellaan niitä vastaavilla  $SCOP_{50} = 3,5$  ja  $SCOP_{40} = 3,8$  koko vuoden läpi. CASE:t sisältävät siis joka vuoden päästöt kahdella hyötysuhteella. Taulukossa 6 on esitetty tarkastelu CASE:t numeroina.

**Taulukko 6. Varastohallin tutkimus CASE:t**

Varastohalli	Osateho (%)	Teho (kW)
CASE 1	70	308
CASE 2	80	352
CASE 3	100	440

Kohteen huippukuorma on hyvin piikikästä. Lämmitys on lähes suoraan verrannollinen ulkolämpötilaan. Tarkasteltuina vuosina ei ole ollut kylmiä, mitoittavaan ulkolämpötilaan verrattavia pitkiä jaksoja. Vuonna 2018 lämmitysteho ei mennyt yli 308 kW kuin 25 tunniksi, joista 15 oli putkeen. Vuonna 2017 huipputeho oli 290 kW. Vuonna 2016 kului vähemmän energiaa, mutta yli 70% tehokuorman ylittäviä tunteja oli yhteensä 51. Tästä voidaan olettaa päästöjen, sekä käyttökustannuksen putoavan erittäin vähän osatehoisuutta nostamalla, kun taas lämpöpumpun, sekä energiakaivokentän investointikustannukset tulevat nousemaan. Kustannuksien kannalta voidaan olettaa, että jopa alle 70% osatehoisuus olisi kannattavin tässä tapauksessa. Taulukossa 7 on esitetty kustannuslaskennan lähtötiedot CASE 1 mitoituksella ja keskiarvoisella kulutuksella.

**Taulukko 7. Varastohallin kustannuslaskennan lähtötiedot**

Varastohalli SCOP = 3,5			
Energiantarve		500 MWh/v	
Lämpöpumpputeho		308 kW	
Geoenergiainvestointi		554400 €	
Laina-aika		15 v	
Lainan korko		2 %	
Lainan lyhennys ja korot		43146 €/v	
Energiakustannukset	Hinta	1. Vuoden kustannus	Hinnan nousu
Sähkö	105,4 €/MWh	52675 €	2 %
Kaukolämpö	70,0 €/MWh	38665 €	3 %
Öljy	100,0 €/MWh	50000 €	4 %
Kaasu	103,2 €/MWh	59215 €	4 %
Geoenergia	31,1 €/MWh	15550 €	2 %

### 4.3.2 Asuinkerrostalot

Seuraavaksi tarkastellaan asuinkerrostalokohteita. Tarkastelukohteiksi valittiin kaksi eri kerrostaloa. Kerrostalo A:n ominaiskulutus on 130 kWh/m<sup>2</sup> ja kerrostalo B:n 83 kWh/m<sup>2</sup> vuodelta 2016. Käyttöveden kuorma tutkittiin samalla tavalla kuin varastohallin tapauk-



sessä, mutta sen kuorma on piikikkäämpää ja ajoittuu illan ja aamun peseytymisajan-kohtiin. Käyttöveden osuus kokonaisenergiankulutuksesta on myös suurempi asuinkerrostaloissa. Käyttöveden huipputeho on kohteessa A noin 24% ja kohteessa B noin 40% kokonaishuipputehosta. Energiaosuudet ovat vastaavasti noin 36% ja 46%. Tämä selittyy kohteen B paremmasta ominaiskulutusarvosta. Tämä tarkoittaa, että kohde B on paremmin lämpöeristetty, mutta käyttöveden kulutus riippuu asukkaiden toiminnasta, eikä siten skaalaudu pienempien lämpöhäviöiden mukana. Kohteiden kulutustiedot on esitetty taulukossa 8.

**Taulukko 8. Asuinkerrostalojen energiatiedot.**

	Kerrostalo A	Kerrostalo B
Ominaiskulutus (kWh/m <sup>2</sup> )	130	83
Lämmitettävä pinta-ala (m <sup>2</sup> )	5000	3800
Huipputeho (kW)	235	138
Energiankulutus (MWh)	645	315

Koska asuinkerrostaloista ei ole vertailtavaa dataa kuin vuodelta 2016, tarkastelu CASE:t ovat vain samojen osatehoisuuksien mukaan ja hyötysuhteen mukaan. Käyttövedelle oletetaan sama maltillinen  $SCOP_{LKV} = 2,8$ . Lämmitys tapahtuu kerrostaloissa oletuksena lattiakiertona, tai patteriverkostossa. Lämmityksen vuosihyötysuhteina käytetään siten  $SCOP_{35} = 4,5$  ja  $SCOP_{55} = 3,5$ . Hyötysuhteet ovat alle todellisen SPF-luvun, jotta sähkön päästökertoimen vaikutus korostuu huippukuorman korkeilla lämpötilasoilla. Taulukossa 9 on esitetty asuinkerrostalojen tutkimusten lämpöpumppujen tehot.

**Taulukko 9. Asuinkerrostalojen tutkimus CASE:t**

Talo A	Osateho (%)	Teho (kW)
CASE 4	70	165
CASE 5	80	188
CASE 6	100	235

Talo B	Osateho (%)	Teho (kW)
CASE 7	70	96
CASE 8	80	110
CASE 9	100	138

Asuinkerrostalojen kulutusdata on vähemmän piikikästä vuorokauden aikana ja käyttöveden osuus on merkittävästi suurempi. Lämpöä tuottaa myös kodinkoneiden ja viihdeelektroniikan käyttö, sekä muu asukkaiden toiminta. Tämä tarkoittaa, että ulkolämpötilan vaikutus ei korostu yhtä merkittäväksi. CASE 4:n ja CASE 5:n huipputehon ylittää 232 ja 61 tuntia. CASE 7:n ja CASE 8:n vuorostaan 124 ja 59 tuntia. Tästä voidaan olettaa, että

osatehoisuuden vaikutus on suurempi kuin varastohallin tapauksessa. Myös hyötysuhteen vaikutus oletetaan hyötysuhteen muutokseen nähden pienemmäksi. Todellinen vaikutus voi olla suuri, sillä hyötysuhteen tarkasteluvaihtoehdot eroavat toisistaan enemmän kuin varastohallissa. Taloudellisesti järkevämmäksi oletetaan myös varastohallia suurempi osatehoisuus. Taulukossa 10 on esitetty asuinkerrostalojen kustannustarkastelun lähtötiedot 70% osatehomitoituksella.

**Taulukko 10. Asuinkerrostalojen kustannustarkastelun esimerkki lähtötiedot**

Asuinkerrostalo A CASE 4 SCOP=3,5				
Energiantarve				646 MWh/v
Lämpöpumpputeho				165 kW
Geoenergiainvestointi				297000 €
Laina-aika				15 v
Lainan korko				2 %
Lainan lyhennys ja korot				23114 €/v
Energiakustannukset	Hinta	1. Vuoden kustannus	Hinnan nousu	
Sähkö	105,4 €/MWh	68056 €	2 %	
Kaukolämpö	70,0 €/MWh	49955 €	3 %	
Öljy	100,0 €/MWh	64600 €	4 %	
Kaasu	103,2 €/MWh	70846 €	4 %	
Geoenergia	33,3 €/MWh	21512 €	2 %	

Asuinkerrostalo B CASE 7 COP=3,5				
Energiantarve				315 MWh/v
Lämpöpumpputeho				96 kW
Geoenergiainvestointi				172800 €
Laina-aika				15 v
Lainan korko				2 %
Lainan lyhennys ja korot				13448 €/v
Energiakustannukset	Hinta	1. Vuoden kustannus	Hinnan nousu	
Sähkö	105,4 €/MWh	33185 €	2 %	
Kaukolämpö	70,0 €/MWh	22050 €	3 %	
Öljy	100,0 €/MWh	31500 €	4 %	
Kaasu	103,2 €/MWh	35042 €	4 %	
Geoenergia	33,7 €/MWh	10616 €	2 %	

Asuinkerrostalo A:n suurempi energiankulutus ja suhteessa pienempi huipputeho tekee siitä oletettavasti taloudellisesti kannattavimman kaikista tarkasteltavista kohteista. Lainan lyhennys ja korot ovat vain 72% suuremmat, kun energiantarve on 105% suurempi kuin asuinkerrostalo B:n tapauksessa.

## 5. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

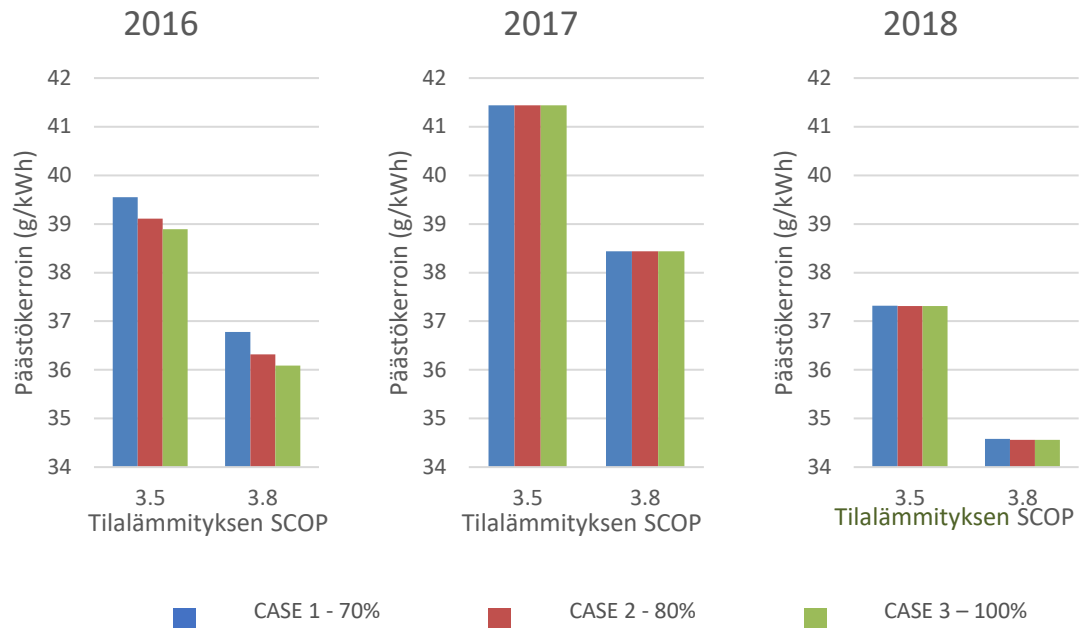
Tässä luvussa käydään läpi tutkimus CASE tulokset, ja verrataan niitä kilpaileviin lämmitysmuotoihin. Tulokset on eritelty päästöihin ja kustannuksiin, ja kustannuksissa otetaan kantaa geoenergian investointikustannuksiin. Vertailussa tarkastellaan investoinnin taloudellista kannattavuutta optimimitoituksella. Lopuksi pohditaan tuloksien vaikutuksia yleisesti ja tulevaisuudessa. Kaikki päästökertoimien yksiköt ovat hiilidioksidigramma-ekvivalenttia, eli  $\text{gCO}_2\text{-ekv/kWh}$ .

### 5.1 Päästötarkastelu

Tarkastellaan ensin osatehoisuuden ja hyötysuhteen vaikutusta päästökertoimiin. Kohteet on eritelty omiin alalukuihinsa. Vuoden 2016 huippukulutustuntien aikana suurin osa tuontisähköstä oli peräisin Ruotsista, ja päästökerroin on siksi samaa luokkaa kuin tuotannolla. Suurimman kulutuksen tunnin aikana päästökerroin laskennassa oli  $193 \text{ g/kWh}$  ja pelkän tuotannon päästökerroin oli silloin  $183 \text{ g/kWh}$ . Koko vuoden korkein päästökerroin oli tuotannossa  $219 \text{ g/kWh}$  ja laskennassa tuontisähkö huomioiden  $267 \text{ g/kWh}$ , kun isompi osa tuonnista oli samanaikaisesti Venäjältä. Tuotannon kertoimen vaihtelu johtuu tuuli- ja vesivoimatilanteesta. 2017 ja 2018 tuontisähkön vaikutukset olivat pienemmät huippukulutuksessa. Vuosittain tuontisähkön huomiointi nostaa sähkön ominaispäästökerrointa noin 5-10%, mutta hetkittäiset vaikutukset ovat suurempia ja voivat olla joko päästöjä alentavia tai nostavia.

#### 5.1.1 Päästötarkastelu CASE 1-3

Tarkastellaan ensin varastohallin tuloksia. Varastohallin kulutusdata sisälsi eniten tehopiikkejä, mikä johtui lämmityksen ajoittumisesta työaikojen mukaan. Tuloksissa ei ole huomioitu geoenergiajärjestelmän energiavaraajia, joiden avulla tehopiikkejä voidaan tasoitaa. Kulutusdata on painottunut merkittävästi huipputehon puoleen vuonna 2016. Tarkasteluvuosien ylivoimaisesti suurin teho, ja pienin kokonaisenergiankulutus tekevät vuoden 2016 datasta poikkeavaa. Vaikutukset päästökertoimien laskentaan ovat pienet, mutta investointikustannuksien kannalta merkittävät. Kuvassa 17 on esitetty CASE 1-3 energia- ja päästölaskennan tulokset.



**Kuva 17. Varastohallin päästökertoimet vuosittain eri osatehoilla**

Tuloksista nähdään, että korkean huipputehon takia osatehoisuus vaikuttaa todella vähän sekä sähkön kulutukseen, että päästöihin, kun huipputehotunteja on vähän. CASE 1:ssä vuonna 2016 lisäsähköä käytettiin 2,23 MWh, joka on 0,54% kokonaislämmitysenergiasta, ja lisäsähkön aiheuttamat päästöt olivat 390 kgCO<sub>2</sub>-ekv, eli 2,37% kokonaispäästöistä huonomman hyötysuhteen tarkastelussa. Tämä tarkoittaa, että lisäsähkön päästökerroin oli 172,8 g/kWh. Lämmityksen vuosihyötysuhteen suhteellinen 0,3 yksikön nousu toi 7,2% laskun ominaispäästökertoimessa, kun osatehon nostaminen 10 prosenttiyksiköllä alentaa päästökerrointa vain 1,1%. Vuosina 2017 ja 2018 lämpöpumpulla kalettiin lähes kaikki energia osatehoisuudesta riippumatta. Suorasähkölämmityksen laskennalliset päästökertoimet olivat vuosijärjestyksessä 130,79 g/kWh, 140,77 g/kWh ja 127 g/kWh. Lämmityssähkön päästökertoimien suuruusluokka myötäilee siten koko vuoden sähköntuotannon päästökertoimien keskiarvoja, ja on sitä noin 10-12% suurempi.

Oleellista on huomata, että kokonaispäästöt kasvoivat vuosina 2017 ja 2018, mutta ominaispäästökertoimet ovat samaa suuruus luokkaa. Tämä johtuu suuremmasta energiankulutuksesta vuosina 2017 ja 2018.

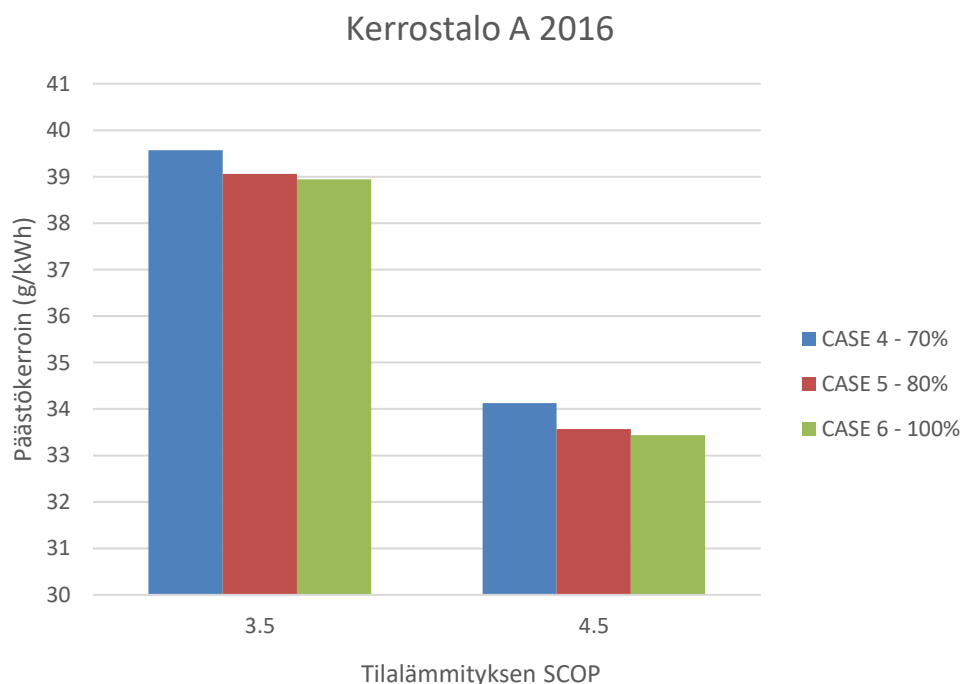
Lämmitysenergian hinta alemmalla hyötysuhteella COP = 3,5 ja kuluttajaluokalla T6 on noin 31,1 €/MWh ja COP = 3,8 lämmitysenergian hinta on 28,9 €/MWh riippumatta osatehoisuudesta. Investointikustannus 1800 €/kW hinnalla 308 kW järjestelmänä olisi 554 400 €. 352 kW järjestelmän investointikustannus olisi 633 600 €. Voidaan siis todeta,

että osatehoisuuden nostaminen tässä tapauksessa ei ole kustannustehokas tapa vähentää päästöjä. Tarkastelluista tapauksista CASE 1 on optimiratkaisu.

Huipputehoja tasapainottamalla vuoden 2018 tasolle, sama 70% osatehoisuus 2018 vuoden huipputeholla ja energiankulutuksella toisi 224 kW järjestelmän ja investointikustannukset olisivat noin 400 000 €. Lämmitysenergian hinta nousisi arvoon 32,1 €/MWh alemmalla hyötysuhteella. Päästökerroin nousisi 39,12 g/kWh:n ja kokonaispäästövaikutus olisi noin 1 tCO<sub>2</sub>-ekv vuodessa. Päästövaikutus olisi siis noin 5% suuruusluokkaa, energiakustannus nousisi 3% ja investointikustannukset pienenisivät 28%.

### 5.1.2 Päästötarkastelu CASE 4-6

Kerrostalo A:n kulutusdata on lähimpänä tavallista vanhempaa kerrostaloa. Tuloksista huomataan, että osatehoisuuden vaikutus on suurempi kuin varastohallissa, mutta silti hyvin vähän suurilla osatehoilla. Korkea energiankulutus ja alhainen tasaisempi huippu-tehotaso tarkoittaa, että myös lisäsähkön määrä on suurempi. Kuvassa 18 on esitetty päästölaskennan tulokset.



**Kuva 18. Kerrostalo A:n päästökertoimet**

CASE 4:ssä lisäsähköä kului 3,78 MWh, mikä vastaa noin 0,6% kokonaislämmitysenergiasta. Lisäsähkön kokonaispäästöt ovat noin 570 kgCO<sub>2</sub>-ekv ja päästökerroin 151,5 g/kWh. Alhaisempi lisäsähkön päästökerroin aiheutuu juuri tasaisemmasta huippukuormasta, kun järjestelmän huipputehon ylittäviä tunteja on myös muualla kuin kylmimmillä

pakkasilla. CASE 5:n päästökerroin on 1,3% pienempi kuin CASE 4: n. Täystehomitoituksella ei saavuteta merkittäviä etuja. Suorasähkön päästökerroin kohteessa on 126,33 g/kWh.

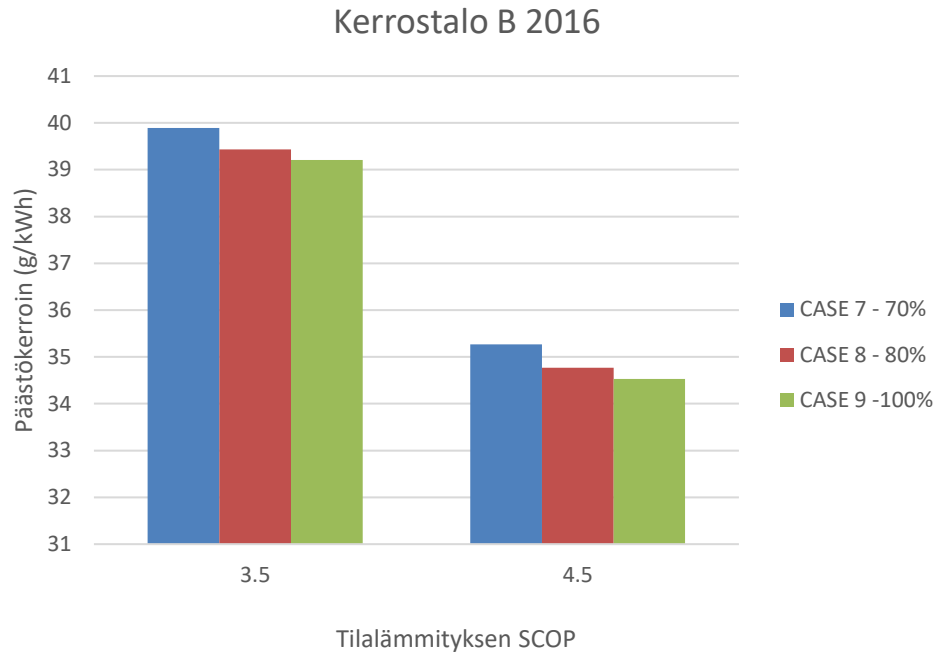
Lämmityksen hyötysuhteen nostaminen 1,0 yksiköllä tuottaa noin 12,7% päästövähennyksen. Suhteessa hyötysuhteen nousuun vaikutus ei ole yhtä suuri kuin varastohallissa. Sama 0,3 yksikön nostaminen aiheuttaisi vain 4,9% päästövähennyksen. Tulos oli odotettavissa, ja aiheutuu käyttöveden suuremmasta osuudesta.

CASE 4:n investointikustannus on noin 297 000 € ja energiakustannus 33,3 €/MWh. Paremmalla hyötysuhteella Investointikustannuksen voidaan olettaa nousevan vaadittavan porausmäärän kasvaessa, kun maasta otetaan suurempi energiamäärä. Nousu on noin 3-5%, mutta energiakustannus on 29,1 €/MWh eli 12,6% pienempi, ja tuo vuodessa siten 2700 € säästöt. Vaadittava lisäinvestointi maksaa siten itsensä takaisin muutamassa vuodessa.

CASE 5:n investointikustannus on noin 338 400 € eli 14% suuremmat kuin CASE 4:ssä, jos systeemin tehokustannus on sama. Todellisuudessa energiamitoitettun järjestelmän kustannukset kasvavat vähemmän energiakentän osalta kuin lämpöpumpputehon osalta, mikä voi alentaa tehokustannusta hieman. Mikäli maasta otettava ominaisenergia pysyy samana, ja muut kustannukset nousevat lineaarisesti investointikustannusten erotus on noin 7%. Energiakustannukset vähenevät vain 1,2%. Voidaan todeta, että osatehoisuuden kasvattaminen ei ole kustannustehokas tapa vähentää päästöjä tässä kohteessa ja optimikustannus saavutetaan CASE 4:ssä.

### **5.1.3 Päästötarkastelu CASE 7-9**

Kerrostalo B:n energiankulutus on pienempi kuin kerrostalo A:n, ja suurempi käyttöveden osuus laskee hyötysuhdetta ja tuo lisää epätasaisuutta kulutukseen. Tämä tarkoittaa pienempiä päästöjä, mutta suurempia ominaispäästöjä. Kuvassa 19 on esitetty päästölaskennan tulokset.



**Kuva 19. Kerrostalo B päästökertoimet**

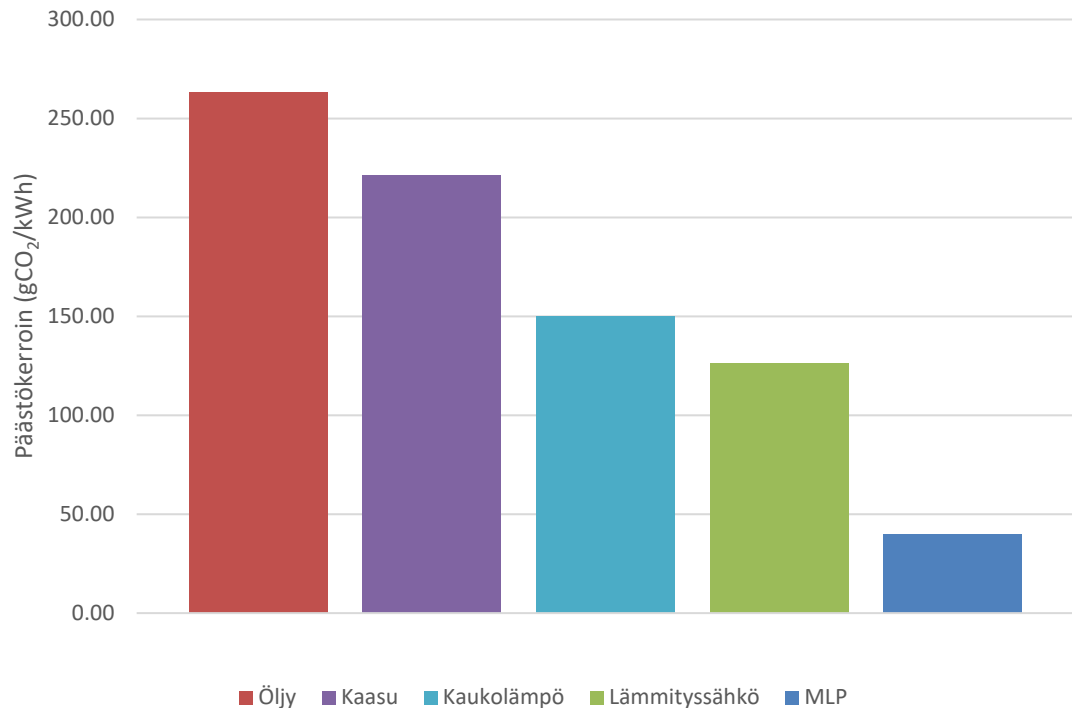
CASE 7:ssä lisäsähkön käyttö oli 1,73 MWh eli vain 0,55% kokonaislämmityksestä, ja sen päästöt olivat yhteensä 300 kgCO<sub>2</sub>-ekv. Lisäsähkön ominaispäästökerroin oli 173,0 g/kWh, eli hyvin samansuuruinen muiden kohteiden kanssa. CASE 8 päästökerroin on noin 1,2% pienempi kuin CASE 7: n. Energian hinta on noin 34 €/MWh. Investointikustannus CASE 7:n 96 kW järjestelmälle on noin 172 800 €. CASE 8:n järjestelmälle vastaavat kustannukset ovat noin 198 000 € ja 33,8 €/MWh. CASE 9:lle 248 400 € ja 33,6 €/MWh. Taas voidaan todeta, että osatehoisuuden nostaminen ei ole kustannustehokas tapa vähentää päästöjä. Optimimitoitus tässä tapauksessa on CASE 7.

## 5.2 Vertailu muihin lämmitysmuotoihin

Tässä luvussa tarkastellaan mitoitettun geoenergijärjestelmän säästöjä muihin lämmitysmuotoihin verrattuna. Myös toteutuneet päästövähennykset esitetään ja päästöjen kustannusvaikutusta tarkastellaan päästöoikeuden kannalta.

### 5.2.1 Päästövertailu

Tutkimuksen perusteella geoenergian päästökertoimeksi saadaan hyötysuhteesta ja tarkasteluvuodesta riippuen 35-40 g/kWh. Lämmityssähkön päästökerroin oli vuosina 2016-2018 noin 125-140 g/kWh. Kuvassa 20 on esitetty lämmitysmuotojen päästökertoimet vuodelta 2018 pylvästaulukkomuodossa. Öljyn ja maakaasun kattilahyötysuhteet on otettu huomioon.



**Kuva 20. Lämmityksen päästökertoimet.**

Kuvasta nähdään, että geoenergia on pienipäästöisin tarkasteltu lämmitysmuoto suuressa erolla. Päästökertoimilla laskettuna päästöoikeuden hinta energiayksikköä kohti on suoraan verrannollinen päästökertoimeen. Taulukossa 11 on esitetty päästöoikeuksien hinnat lämmityslähteittäin 28 €/tCO<sub>2</sub>-ekv päästöyksikön hinnalla. Päästöoikeuden hintoja ei lisätä kustannustarkastelussa kannattavuuslaskentaan.

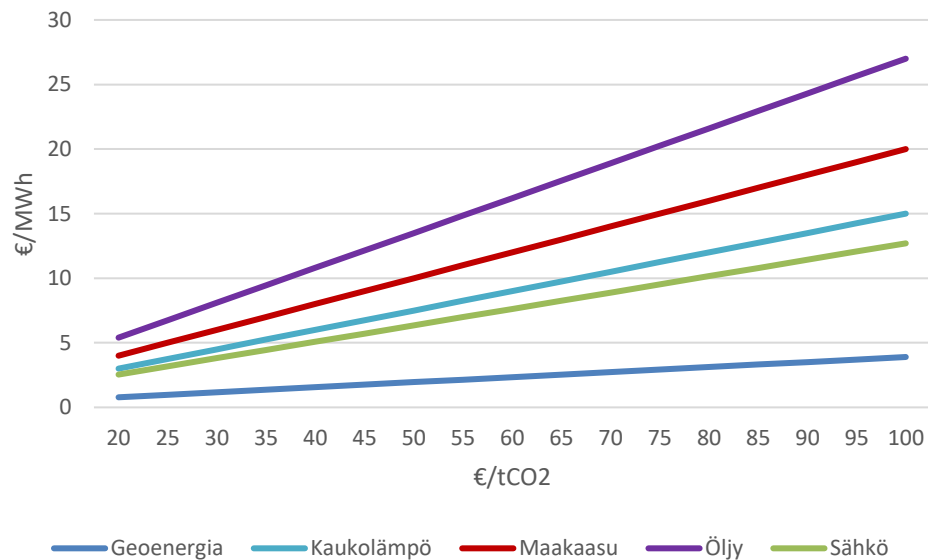
**Taulukko 11. Päästöoikeuden hinta lämmityslähteittäin.**

Geoenergia	1,11 €/MWh
Lämmityssähkö	3,64 €/MWh
Kaukolämpö	4,20 €/MWh
Öljy	7,37 €/MWh
Kaasu	6,19 €/MWh

Päästöoikeuden hinta on hyvin pieni kuluttajan maksamaan energian hintaan verrattuna. Geoenergian pienen päästökertoimen ansiosta päästöoikeuden hinnan huomioon ottaminen ei vaikuta merkittävästi mitoituksen osatehoisuuden kannattavuuteen. Vaikka päästöoikeuden hinta nousisi tulevaisuudessa 100 €/tCO<sub>2</sub>. Silloin osatehoisuutta nostamalla 80%:iin kokonaisvaikutus energian hintaan on noin 0,5 €/MWh. Päästöoikeuden hinnan huomioiminen nostaisi kuitenkin geoenergian kannattavuutta muihin tarkasteltuihin lämmitysmuotoihin nähden huomattavasti. Kuvassa 21 on esitetty päästöoikeuden



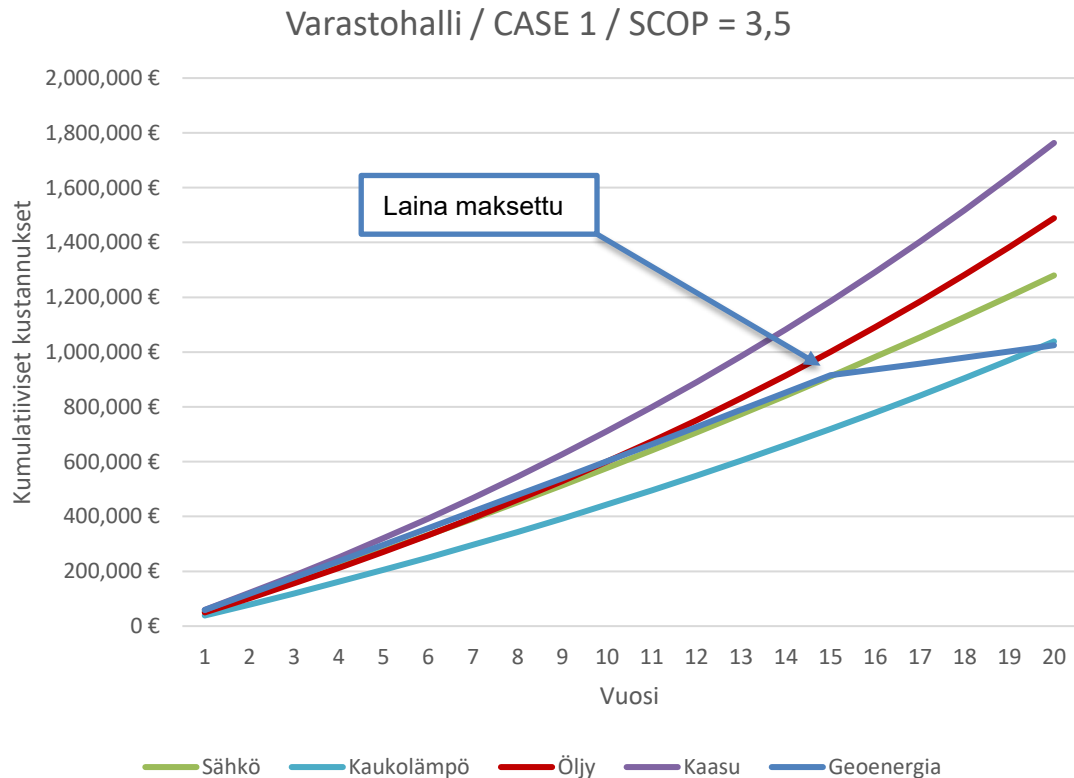
hinnan nousun vaikutus lämmitysmuotojen energiakustannuksiin kuvan 20 päästökertoimilla. Vaikutukset sähkön ja kaukolämmön hintaan tulevat olemaan reilusti pienemmät tulevaisuuden pienemmillä päästökertoimilla. Geoenergian kustannusvaikutus tulee laskeumaan vähemmän hyötysuhteen vaikutuksen takia.



**Kuva 21. Päästöoikeuden hinnan nousun vaikutus lämmitysmuotojen energiakustannuksiin**

### 5.2.2 Kustannusvertailu

Tarkastellaan ensin varastohallin energia- ja investointikustannuksia. Kuvassa 22 on esitetty varastohallin investointi ja energiakustannukset geoenergialle, sekä vertailtaville lämmitysmuodoille. Energiakustannus geoenergialle valittiin hyötysuhteiden välistä. Kustannuskehityksen hinnannousut ovat luvussa 4 esitetyt prosentit. Lainan lyhennys on vuoden lopussa maksettava kiinteä kustannuserä ja laskettu valmiilla Excel-PMT-funktiolla. Öljyn ja kaasun hinnat huomioivat kattilahyötysuhteen ja kaasun liittymäkohtaisen kiinteän siirtokustannuksen. Samoja ehtoja käytetään kaikissa kustannusvertailuissa.

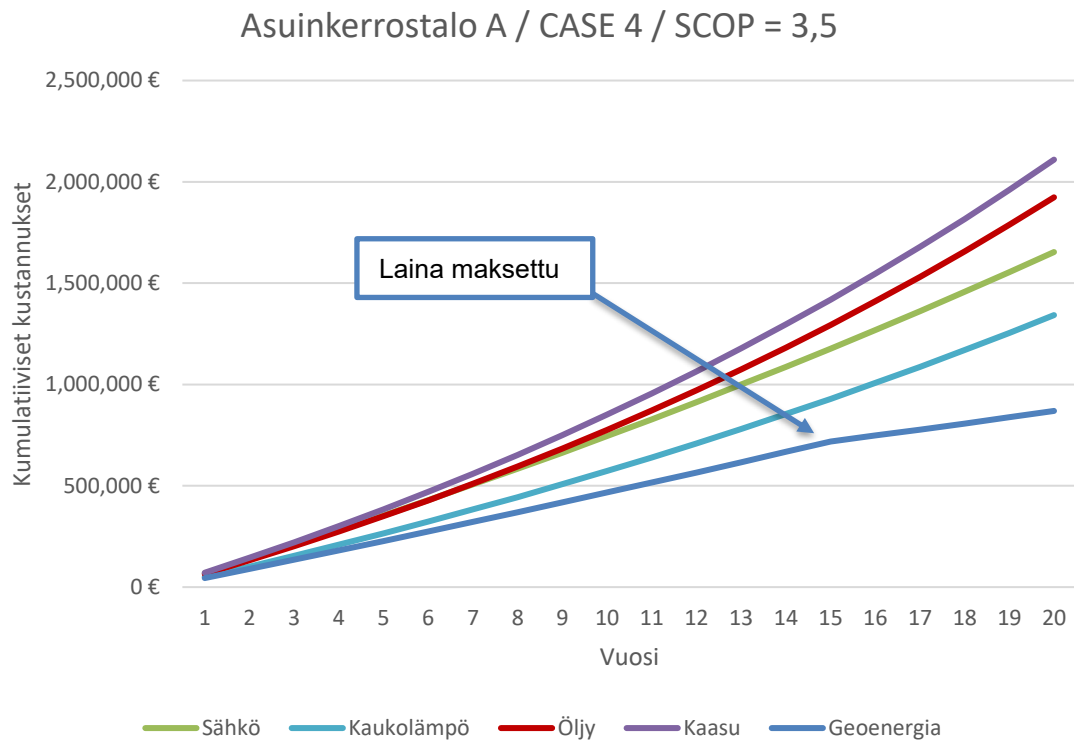


**Kuva 22. Varastohalli CASE 1 kumulatiiviset kustannukset eri lämmitysmuodoilla**

Varastohallin investointi tuottaa voittoa 70% osateholla ensimmäisenä vuonna vain maa-kaasuun verrattuna. Kuitenkin hintakehityksen, ja geoenergian ilmaisenergian suuren osuuden takia laina-ajan lopussa geoenergia on tuottanut voittoa kaikkiin paitsi kaukolämpöön verrattuna. Lainan lyhennykset loppuvat 15 vuoden kohdalla, mikä selittää kulmakertoimen muutoksen geoenergian kumulatiivisissa kustannuksissa. 20 vuoden kohdalla investointi on kannattava myös keskihintaista kaukolämpöä vastaan, jonka jälkeen geoenergiajärjestelmään on oletettavissa korjauskustannuksia.

Varastohallin tapauksessa on paljon muuttuvia tekijöitä, ja investointi ei ole todellinen optimi. CASE 1 osateho on muina vuosina 95-110% huipputehosta. Tässä tapauksessa alhaisempi osateho toisi kannattavamman investoinnin. Aiemmin mainittu 224 kW järjestelmä vuoden 2018 kulutusdatalla tuottaisi kumulatiivisesti voittoa kaukolämpöön verrattuna 10. vuoden kohdalla samoilla oletuksilla. Vuoden 2016 huipputehosta 224 kW on noin 50%. Huipputehon piikkiä tasoittamalla ja huomioimalla varaajat, tasaisemman tilalämmityksen tai vaihtoehtoiset huipputehon lämmitysmenetelmät nostavat geoenergiainvestoinnin kannattavuutta.

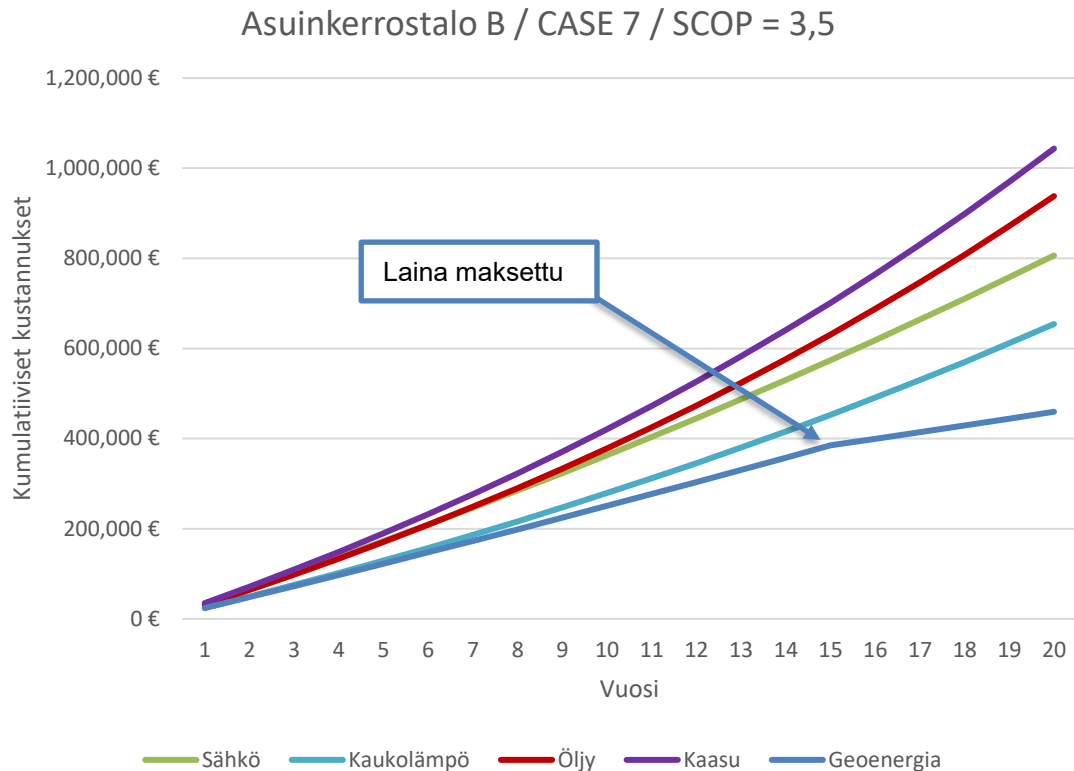
Tarkastellaan seuraavaksi Asuinkerrostalo A:n kustannusvertailua. Asuinkerrostalo A:n energiankulutus on suuri ja teho on suhteessa pieni. Tämä tarkoittaa kaivokentän tulevan energiamitoitettuna edullisemmaksi kuin tehomitoitetussa varastohallissa. Kuvassa 23 on esitetty asuinkerrostalo A:n kustannusvertailu.



**Kuva 23. Asuinkerrostalo A CASE 4 kumulatiiviset kustannukset eri lämmitysmuodoilla**

Tässä tapauksessa asuntoyhtiö tekee voittoa jo ensimmäisenä vuotena kaikkiin kilpaileviin lämmitysmuotoihin verrattuna, kun lainanhoitokulut ovat maltilliset ja energiakustannus edullinen. Tämä tarkoittaa taloyhtiön näkökulmasta sitä, että heti projektin käyttöön tultua huoltovastiketta voidaan alentaa pysyvästi, tai varoja voidaan käyttää muihin korjaustoimenpiteisiin.

Seuraavana käsitellään asuinkerrostalo B:n kustannusvertailu. Kannattavuuteen vaikuttavat alhaisempi energiankulutus ja korkeampi käyttöveden osuus, jotka lisäävät huipputehon merkitystä mitoituksessa ja siten investoinnissa, ja vähentävät edullisemman energiakustannuksen vaikutusta investoinnin kannattavuuteen. Kuvassa 24 on esitetty asuinkerrostalo B:n kustannusvertailu.



**Kuva 24. Asuinkerrostalo B CASE 7 kumulatiiviset kustannukset eri lämmitysmuodoilla**

Myös asuinkerrostalo B tekee voittoa jo ensimmäisenä vuotena kaikkiin lämmitysmuotoihin verrattuna. Kaukolämpöön verrattuna voidaan sanoa kustannusten pysyvän samana ensimmäiset vuodet ja oletetun hintakehityksen vaikutuksesta geoenergian kumulatiiviset tuotot kasvavat.

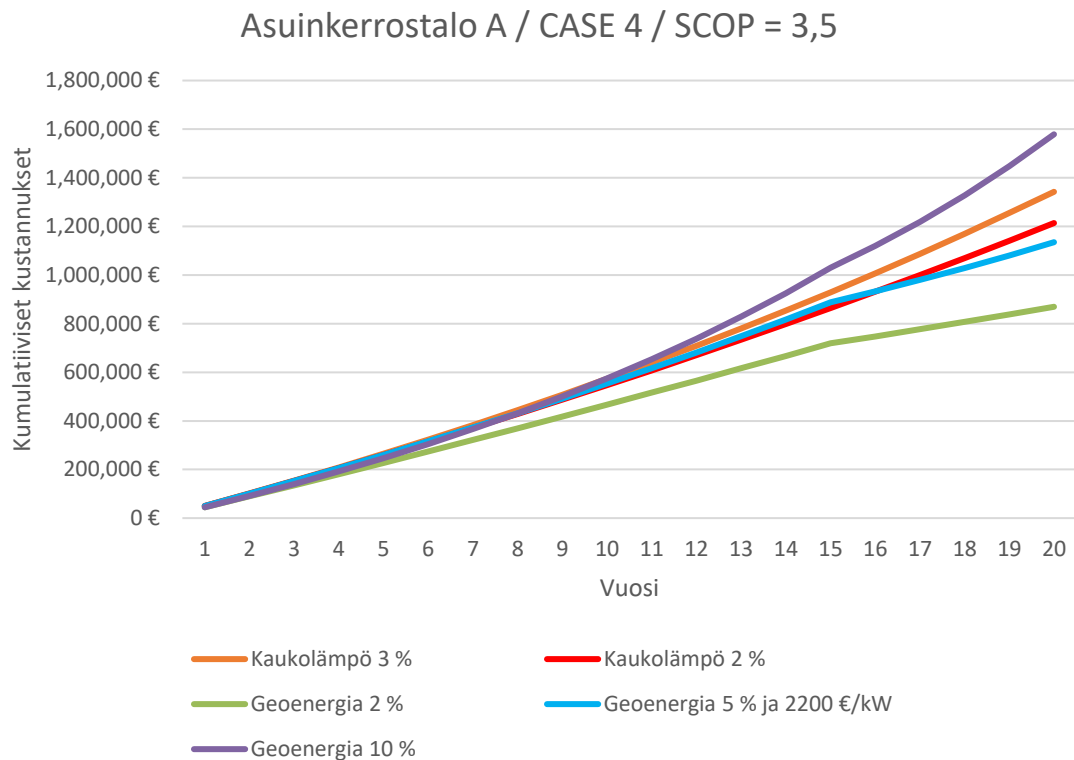
### 5.3 Herkkyystarkastelu

Tässä luvussa tarkastellaan päästö- ja kustannuslaskennan oletuksien oikeutta ja niiden vaikutusta laskennan tulokseen.

Päästökertoimien laskennan kannalta merkittävin tekijä on käytetty vuosihyötysuhde, mikä riippuu lämpöpumpusta ja lämmitysverkon lämpötilatasosta. Osatehoisuus on pienempi tekijä.

Kannattavuuden kannalta ainoa varteenotettava kilpailija on kaukolämpö. Fossiilisten polttoaineiden kustannukset tosin voivat vaihdella merkittävästi. Jos hinnat romahtavat, geoenergian kilpailukyky kärsii. Laskennassa ei ole otettu huomioon kiinteistön myyntihinnan nousua energiasaneerauksen jälkeen. Geoenergiajärjestelmä nostaa kohteen myyntihintaa ja nopeuttaa myyntiaikaa, kun energiakustannukset ovat pienet ja kiinteistöä voidaan markkinoida ekologisena. [51] Myös mahdollinen jäähdytys lisää kohteen

houkuttelevuutta. Kuvassa 25 on esitetty kaukolämmön ja geoenergian hintakehityksen muuttumisen, sekä geoenergian investointikustannuksen vaikutus CASE 4:n kannattavuustarkasteluun. Investointikustannuksen 22%:n korotus 2200 €/kW:n vaikuttaa lainanlyhennyskuluhiin saman verran, kun korkoprosentin nostaminen 5%:iin.



**Kuva 25. CASE 4:n kannattavuuden herkkyytarkastelu**

Geoenergian ja kaukolämmön päästöt ovat Suomessa niin alhaiset, että nykyisellä päästöoikeuden hinnalla päästökustannus ei merkittävästi vaikuta investoinnin kannattavuuteen. Jos sähkön hintakehitys nousee 5%:iin, CASE 4:n tapauksessa geoenergia on silti edullisempaa kuin keskihintainen kaukolämpö 2%:n hintakehityksellä. Jos samaan aikaan investointikustannukset nousevat kuvan mukaan arvoon 2200 €/kW, on kaukolämmön kanssa kilpailu kustannuksissa tiukkaa. Sitä suuremmat, hypoteettiset sähkön hinnan nousuprosentit tekevät geoenergiasta selvästi keskihintaista kaukolämpöä kalliimpaa. Jos taas kaukolämmön hinnan vuosikehitys nousee edes 4%:iin, geoenergian etu on merkittävä. Kaukolämmön hintatason nousuprosentti perustuu viimevuosien hintakehitykseen, mutta tulevaisuudessa polttoaineiden hinnat voivat nousta enemmän. Toisaalta joillakin paikkakunnilla biopolttoaineiden käyttöönotto on pudottanut kaukolämmön hintaa. Huomattavaa on, että CASE 4 oli tutkittavista tapauksista geoenergian kannalta kannattavin. Muissa, vähemmän energiaa kuluttavissa kohteissa vaikutukset geoenergian kannattavuuteen ovat suuremmat.

Investointikustannukset vaihtelevat hyvin pitkälti kohteen kulutuksen ja kallioperän ominaisuuksien mukaan. Kaikki tarkastelut on tehty tavallisella graniittiin verrattavalla kallioperällä ja Etelä-Suomen lämpötilaolosuhteilla. Huonommilla järjestelmän ominaisuuksilla investointikustannukset voivat nousta liian suuriksi. Toisaalta kiinteistön näkökulmasta optimi ratkaisuksi usein muodostuisi osatehoisen geoenergian ja kaukolämmön tai biokaasun hybridijärjestelmä, jossa suuri osa energiasta tuotetaan edullisella geoenergialla ja huipputehon aikaan käytössä on sähkötehoa lisäämätöntä, pienipäästöistä lämpöä.

## 5.4 Pohdinta

Geoenergia sopii erinomaisesti korvaamaan fossiilisia polttoaineita. Laskennallisen geoenergian päästökertoimen 39 g/kWh perusteella jokainen öljylämmityksestä geoenergiin vaihtava kiinteistö vähentää Suomen hiilidioksidipäästöjä noin 224 kg/MWh. Jos kaikki fossiiliset vaihdettaisiin geoenergiin, näillä luvuilla päästövähennys olisi noin 2,5 MtCO<sub>2</sub>-ekv. Päästötavoitteiden kannalta on huomattava, että lämpöpumpun käyttämä sähkö kuuluu päästökauppaan. Tällöin kaikki fossiilisten polttoaineiden päästöt voidaan poistaa taakanjakosektorilta, mikä helpottaa Suomen päästötavoitteisiin pääsyä merkittävästi. Päästövähennyspotentiaali on taakanjakosektorin 2030 tavoitteisiin verrattuna noin 32%. Päästöjen vähentäminen on myös kustannustehokasta, sillä investoinnit ovat taloudellisesti hyvin kannattavia ja kiinteistöjen omistajat tekevät investoinnit itse. Investointi on sitä kannattavampaa, mitä suurempi ja tasaisempi energiankulutus on, verrattuna huipputehoon.

Sähkölämmityksestä siirtyminen on kannattavaa päästöjen, ja sähkönkulutuksen näkökulmasta. Samalla se on hyvä vastaus energiatehokkuusvaatimuksiin. Kaikki vesikeskuksella toimivat sähkölämmitysjärjestelmät kannattaisi laskennan perusteella vaihtaa geoenergiin. Suoran sähköpatterilämmitteisen järjestelmän vaihtamisessa on otettava huomioon vesikiertoisen lämmitysjärjestelmän asennuskustannukset. Sähkölämmityksestä poistuminen vähentää lämpöpumppujen vaikutuksia sähköverkon kulutukseen, ja on tärkeä osa tulevaisuuden sähköverkon kulutushuippujen tasaamisessa, jos lämpöpumput yleistyvät kiihtyvällä tahdilla ja nopeasti säätyvä sähköntuotanto vähenee.

Puun pienpoltosta siirtyminen geoenergiin tuo laskennallisesti pienen lisän päästöihin ja sähkön kulutukseen. Biopolttoaineiden riittävyyden kannalta se on kuitenkin etu, joka mahdollisesti auttaa myös energiasektoria pääsemään päästökaupan tavoitteisiin. Pienpoltossa vapautuu myös haitallisia pienhiukkasia ja mustahiiltä. Suurin osa mustahiili-

päästöistä aiheutuu puun pienpoltosta, ja sen ilmastoa lämmittävä kumulatiivinen vaikutus on verrattavissa kaikkiin Suomen metaanipäästöihin, ollen siten toiseksi suurin ilmastoa lämmittävä päästö hiilidioksidin jälkeen. [2]

Tulevaisuudessa on oleellista huomata sähköverkkovaikutukset. Merkittävimmät tekijät sähköön perustuvien lämmitysjärjestelmien päästöjen vähentämisessä tulevaisuudessa on kivihielestä luopuminen, Olkiluoto 3 -ydinvoimalan valmistuminen ja tuulivoimainvestointien lisääntyminen. Oletettavaa on siis, että päästöttömän tuotantokapasiteetin lisääntyminen alentaa sähkön päästökerrointa tulevaisuudessa merkittävästi. Päästökaupan tehtävänä on ohjata kustannuksia päästöttömään. Kuvasta 14 nähtiin, että lauhdevoima on hyvin pieni osa myös huippukuorman aikaan. Ydinvoiman osuus tulee nousemaan ja yhteistuotannon päästöt vähenevät. Tuulivoima on niin pieni osuus, että sen mahdollinen puutos voidaan kattaa uudella ydinvoiman tuotannolla ja vesivoiman tai tuontisähkön säädöllä. Hyvässä tuulitilanteessa lauhdevoimaa ei tarvita ollenkaan, ja sähkön markkinahinta putoaa myös kovassa kulutuksessa. Euroopan sähköverkot yhdistyvät Green Deal -hankkeen mukaan ja sähkömarkkinat tuovat kasvavaa päästötöntä tuotantokapasiteettia siten myös muista maista.

Vuonna 2020 Suomessa otettiin käyttöön uusi energia-avustus, jossa energiankulutuksen alentamiseen voi saada merkittävän valtion tuen. Energia-avustukseen vaadittavat vähennykset lasketaan kaavalla, jossa päästöt painotetaan lämmitysmuodon mukaisella E-luvulla. Fossiilisilla polttoaineilla E-luku on 1, kaukolämmöllä 0,5 ja sähköllä 1,2. [52] Geoenergia saa hyötysuhteen mukaisen sähkön luvun. Päästökertoimia katsomalla luvut eivät ole todellisuutta vastaavat. Energia-avustuksella voi kuitenkin saada merkittävästi tukea geoenergiainvestointiin, mikä lisää kannattavuutta fossiilisia polttoaineita vastaan.

Sitran elämäntapatestin laskentaperusteena 2018 sähkölämmityksen kerroin on 281 g/kWh ja samaa kerrointa käytetään maalämpöpumpun käyttämän sähkön perusteena hyötysuhde huomioiden. Ilmalämpöpumpuille oletetaan maalämpöpumppuun verrattava hyötysuhde, mikä ei toteudu tilastokeskuksen lämpöpumppujen energiantuotantodatan mukaan. Sitran laskennassa myös kaukolämmön kerroin on merkittävästi suurempi, 267 g/kWh. [53] Lämmityksen päästöt ovat siis laskentaperusteissa liian suuret.

## 6. YHTEENVETO

Geoenergia kasvattaa suosiotaan kiinteistöjen päälämmitysjärjestelmänä. Vuonna 2017 maalämpöpumpuilla tuotettiin 3,47 TWh lämpöenergiaa, josta kompressorisähköä oli 0,97 TWh. Maalämpöpumppuja on asennettu 2019 mennessä noin 200 000 kappaletta, ja kasvu on nopeutunut viime vuosina. Suurin osa geoenergiajärjestelmistä on uusissa ja remontoituissa pientaloissa, mutta asuinkerrostalot ja palvelukiinteistöt ovat kasvattaneet osuuttaan merkittävästi. Lämpöpumpuilla tuotetusta energiasta jo noin 9% meni muihin kuin asuinrakennuksiin vuonna 2017.

Geoenergialla on tärkeä rooli Suomen päästö- ja energiatehokkuustavoitteiden saavuttamisessa. Maalämpöpumpuilla on hyvän hyötysuhteensa takia muita lämpöpumppuja korkeampi potentiaali energiankulutuksen pienentämisessä ja taakanjakosektorin päästöjen vähentämisessä. Geoenergialla korvataan merkittävästi tuontienergiaa, mikä lisää energiaomavaraisuutta. Maalämpöpumppujen kotimaisuusaste on korkea, ja järjestelmillä on positiivinen työllistävä ja kansantaloudellinen vaikutus. Geoenergiajärjestelmiin sopii hyvin hybridilämmitysratkaisut ja maalämpöpumpuilla voidaan tuottaa myös jäähdytystä ja lämmön varastointia kallioperään.

Osatehomitoituksessa lämpöpumppu mitoitetaan kattamaan vain osa rakennuksen tehotarpeesta kustannustehokkuussyistä. Osatehoiset geoenergiajärjestelmät lisäävät sähköverkon huippukulutusta, kun sähkövastuksilla tuotetaan loput energiantarpeesta huippukuormalla. Geoenergia vähentää energiankulutusta, mutta lisää sähkönkulutusta. Tärkeä osa järjestelmien sähköverkon vaikutuksien minimoinnista on sähkölämmityksen korvaaminen. Kokonaisvaikutus riippuu alueellisesti korvattavien lämmitysmuotojen osuuksista. Geoenergiajärjestelmissä on suurehko potentiaali kysyntäjoustoon, jonka avulla saavutettaisiin taloudellisia sekä teknisiä hyötyjä. Järjestelmien varaajakapasiteetti tulee olla riittävän suuri jouston mahdollistamiseksi.

Tässä työssä tutkittiin geoenergian päästökerrointa tutkimalla järjestelmän käyttämän sähkön tuntikohtaista päästökerrointa ja tutkimuskohteiden tuntikohtaista lämmitystarvetta. Geoenergialle saadaan hyvän hyötysuhteen vuoksi erittäin pieni päästökerroin. Korkealämpötilaisessa järjestelmässä noin 39 g/kWh ja matalalämpötilaisessa noin 34 g/kWh. Päästökerroin laskee sähköntuotannon päästökertoimen mukana. Interpoloimalla laskentatulokset vuoteen 2019 päästökerroin korkealämpötilaisessa järjestelmässä on noin 31 g/kWh. Työssä laskettiin myös suorasähkölämmityksen päästökerroin,



joka on tarkasteluvuosina noin 130 g/kWh. Päästökertoimia verrattiin muihin lämmitysmuotoihin. Geoenergia on tarkastelluista lämmitysmuodoista selvästi vähäpäästöisin. Työssä todettiin myös, että osatehoisuuden kasvattaminen ei vähennä päästöjä kustannustehokkaasti, ja korkeampi hyötysuhde lämpöpumpulla vaikuttaa päästöihin sekä kannattavuuteen tehokkaammin. Järjestelmien hyötysuhde nousee teknologian kehittyessä, mutta suurempi merkitys hyötysuhteeseen on lämmitysjärjestelmän lämpötilatasolla.

Geoenergialla voidaan vähentää rakennusten lämmityksestä taakanjakosektorin päästöjä enintään 3 MtCO<sub>2</sub>-ekv, joka on noin 10% kaikista taakanjakosektorin päästöistä. Vuoden 2030 päästötavoitteeseen vaadittavista päästövähennyksistä geoenergian potentiaali on noin 32%. Suurin yksittäinen päästöryhmä on maantieliikenne.

Geoenergialla on suuri investointikustannus, mutta edullinen lämmitysenergian hinta. Järjestelmät ovat kiinteistö ja sijainti riippuvaisia. Tarkastelluissa kohteissa tavallisilla hyvillä lämpöominaisuuksilla ja nykyisellä alhaisella korkotasolla investoinnit ovat hyvin kannattavia. Suurissa investoinneissa on hyvin suositeltavaa varmistaa oikea mitoitus kattavalla suunnittelulla ja kallioperän lämpövaste – testillä. Suunnittelun osuus investointikustannuksista on hyvin pieni ja sillä voidaan varmistaa järjestelmän toimivuus ja todelliset kustannukset. Geoenergiajärjestelmä pienentää taloyhtiön hoitovastiketta energiakustannuksien takia. Investoinnin kannattavuus paranee paljon energiaa kuluttavissa kohteissa.

Tämän diplomityön tutkimuksen perusteella tuotettiin tarkempia kertoimia päästölaskentaan sähkön ja geoenergian osalta. Virallisissa ohjeissa on lämmityssähkön päästökertoimena käytetty paljon suurempia lukuja. Tässä työssä todettiin geoenergian päästövähennyspotentiaali ja järjestelmän mahdollisuudet ja haasteet tulevaisuudessa. Työssä tuotettiin Excel-laskentapohja Rototec Oy:lle, jonka avulla voidaan verrata geoenergiajärjestelmän päästöjä muihin lämmitysmuotoihin tuntidatan perusteella ja tarkastella investoinnin ja osatehon vaikutusta järjestelmän kannattavuuteen.

## LÄHTEET

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2014). AR5 Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability
- [2] Tilastokeskus, Suomen Kasvihuonepäästöt 1990–2018, ISBN 978–952–244–616–9
- [3] Jokela, Esa. (2014) Lämpöpumppujärjestelmien vaikutus energiayhtiön liiketoimintaan
- [4] Pesonen, Joni. (2018) Maalämpöjärjestelmän mitoitus ja kustannusarvio
- [5] Tuunanen, Jussi. (2009) Lämpöpumppujen vaikutukset sähköverkkoliiketoiminnan kannalta
- [6] Peura, P., Hiltunen, E., Haapanen, A., Auvinen, K., Soukka, R., Törmä, H., Kujala, S., Pohjola, J., Mäkiranta, A., Välisuo, P., Grönman, K., Kumar, R., Rasi, S., Lehtonen, E. & Anttila, P. (2017) Hajautetun uusiutuvan energian mahdollisuudet ja rajoitteet (HEMU), valtioneuvoston kanslia, <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/160251>.
- [7] Motiva. (2018) Lämpöpumppujen hankintaopas – kunnat ja taloyhtiöt
- [8] EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON PÄÄTÖS N:o 406/2009/EY, tehty 23 päivänä huhtikuuta 2009, jäsenvaltioiden pyrkimyksistä vähentää kasvihuonekaasupäästöjään yhteisön kasvihuonekaasupäästöjen vähentämissitoumusten täyttämiseksi vuoteen 2020 mennessä
- [9] EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON ASETUS (EU) 2018/842, annettu 30 päivänä toukokuuta 2018, sitovista vuotuisista kasvihuonekaasupäästöjen vähennyksistä jäsenvaltioissa vuosina 2021–2030, joilla edistetään ilmastotoimia Pariisin sopimuksen sitoumusten täyttämiseksi, sekä asetuksen (EU) N:o 525/2013 muuttamisesta
- [10] EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON ASETUS (EU) 2018/841, annettu 30 päivänä toukokuuta 2018, maankäytöstä, maankäytön muutoksesta ja metsätaloudesta aiheutuvien kasvihuonekaasujen päästöjen ja poistumien sisällyttämisestä vuoteen 2030 ulottuviin ilmasto- ja energiapolitiikan puitteisiin sekä asetuksen (EU) N:o 525/2013 ja päätöksen N:o 529/2013/EU muuttamisesta
- [11] KOMISSION TIEDONANTO EUROOPAN PARLAMENTILLE, EUROOPPA-NEUVOSTOLLE, NEUVOSTOLLE, EUROOPAN TALOUS- JA SOSIAALIKOMITEALLE JA ALUEIDEN KOMITEALLE Euroopan vihreän kehityksen ohjelma Bryssel 11.12.2019 COM(2019) 640 final
- [12] Työ ja elinkeinoministeriön julkaisuja – Energia - 2019:26, Energiatehokkuusryhmän väliraportti
- [13] Tilastokeskus 2018. Energia 2018 – taulukkopalvelu. Taulukko 7.3 [https://pxho-pea2.stat.fi/sahkoiset\\_julkaisut/energia2018/start.htm](https://pxho-pea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2018/start.htm) [viitattu 19.01.2020]

- [14] Suomen virallinen tilasto (SVT): (2018) Sähkön ja lämmön tuotanto [verkkojulkaisu]. ISSN=1798-5072. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 21.1.2020]. Saantitapa: <http://www.stat.fi/til/salatuo/>
- [15] Tilastokeskus (2018). Energia 2018 – taulukkopalvelu. Taulukko 3.2 [https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset\\_julkaisut/energia2018/start.htm](https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2018/start.htm) [viitattu 19.01.2020]
- [16] Energiateollisuus ry. (2018) Energiavuosi 2018 Sähkö, [verkkojulkaisu]. [viitattu 21.1.2020] [https://energia.fi/julkaisut/materiaalipankki/energiavuosi\\_2018\\_-\\_sahko.html#material-view](https://energia.fi/julkaisut/materiaalipankki/energiavuosi_2018_-_sahko.html#material-view)
- [17] Energiateollisuus ry. (2019) Energiavuosi 2019 Sähkö, [verkkojulkaisu]. [viitattu 21.1.2020] [https://energia.fi/julkaisut/materiaalipankki/energia-vuosi\\_2019\\_sahko.html#material-view](https://energia.fi/julkaisut/materiaalipankki/energia-vuosi_2019_sahko.html#material-view)
- [18] Tilastokeskus 2018. Energia 2018 – taulukkopalvelu. Taulukko 3.5 [https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset\\_julkaisut/energia2018/start.htm](https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2018/start.htm) [viitattu 21.01.2020]
- [19] Tilastokeskus 2018. Energia 2018 – taulukkopalvelu. Taulukko 3.9 [https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset\\_julkaisut/energia2018/start.htm](https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2018/start.htm) [viitattu 21.01.2020]
- [20] Rinne, E., Holttinen, H., Kiviluoma, J., & Rissanen, S. (2018). Effects of turbine technology and land use on wind power resource potential. *Nature Energy*, 3(6), 494-500. doi:<http://dx.doi.org.libproxy.tuni.fi/10.1038/s41560-018-0137-9>
- [21] Pilpola, S. & Lund, P.D. (2019). Different flexibility options for better system integration of wind power, *Energy Strategy Reviews*, Vol. 26 pp. 100368. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X19300550>.
- [22] Tilastokeskus 2018. Energia 2018 – taulukkopalvelu. Taulukko 8.1 [https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset\\_julkaisut/energia2018/start.htm](https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2018/start.htm) [viitattu 24.01.2020]
- [23] Tilastokeskus 2018. Energia 2018 – taulukkopalvelu. Taulukko 8.2 [https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset\\_julkaisut/energia2018/start.htm](https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2018/start.htm) [viitattu 24.01.2020]
- [24] Tilastokeskuksen PxWeb-tietokannat. 116h -- Rakennukset (lkm, m2) käyttötarkoituksen ja lämmitysaineen mukaan, 2018 [http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_asu\\_\\_rakke/stat-fin\\_rakke\\_pxt\\_116h.px/](http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__asu__rakke/stat-fin_rakke_pxt_116h.px/)
- [25] Tilastokeskus. (2019) Polttoaineluokitus 2019 [https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut\\_polttoaineluokitus.html](https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html)
- [26] Paiho Satu, Heimonen Ismo, Grahni Elina, Abdurafikov Rinat, Kannari Lotta, Mikkola Markku, Ryyänen Tapani, Laukkanen Timo, Ypyä Joel & Kaukonen Samponen. (2016) Visions for future energy efficient district energy systems, VTT Technical Research Centre of Finland Ltd. Espoo. <http://www.vttresearch.com/impact/publications>.
- [27] Pöyry. (2019) Huoltovarmuus Energiamurroksessa, Raportti Huoltovarmuuskeskukseen.
- [28] Energiateollisuus ry. (2018) Kaukolämpö 2018 Graafeina, [verkkojulkaisu]. [viitattu 21.1.2020] [https://energia.fi/julkaisut/materiaalipankki/kaukolampo\\_2018\\_graafeina.html#material-view](https://energia.fi/julkaisut/materiaalipankki/kaukolampo_2018_graafeina.html#material-view)

- [29] Energiateollisuus ry. (2019) Energiavuosi 2019 Kaukolämpö, [verkkojulkaisu]. [viitattu 21.1.2020] [https://energia.fi/julkaisut/materiaalipankki/energia-vuosi\\_2019\\_kaukolampo.html#material-view](https://energia.fi/julkaisut/materiaalipankki/energia-vuosi_2019_kaukolampo.html#material-view)
- [30] 416/2019 Laki hiilen energiakäytön kieltämisestä, 5 § Hiilen energiakäytön kieltäminen; <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2019/20190416>
- [31] Energiateollisuus ry. (2019) Kaukolämmön hinta 1.1.2019 [verkkojulkaisu]. [viitattu 21.1.2020] [https://energia.fi/julkaisut/tilastot/kaukolampotilastot/kaukolammmon\\_hinta](https://energia.fi/julkaisut/tilastot/kaukolampotilastot/kaukolammmon_hinta)
- [32] Tilastokeskus 2018. Energia 2018 – taulukkopalvelu. Taulukko 2.11 [https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset\\_julkaisut/energia2018/start.htm](https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2018/start.htm) [viitattu 25.01.2020]
- [33] Airaksinen, J., Bröckl, M., Rautiainen, T., Saario, M., Vanhanen, J., Värre, U., Honkapuro, S., Annala, S., Manninen, J., Lassila, J. & Partanen, J. (2019) Selvitys sähkön omatuotantoon, energiayhteisöihin ja energiahankkeiden lupamenetelyihin liittyvistä kysymyksistä, valtioneuvoston kanslia, <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161978>.
- [34] Sulpu, (2019). Suomen lämpöpumpputilastot, Vuosi 2019. <https://www.sulpu.fi/documents/184029/0/La%CC%88mpo%CC%88pumpputilasto%202019%2C%20%20kuvaajat%20FI.pdf>
- [35] Wu, W. & Skye, H.M. (2018). Progress in ground-source heat pumps using natural refrigerants, International Journal of Refrigeration, Vol. 92 pp. 70-85. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700718301865>.
- [36] Geologinen tutkimuskeskus GTK. (2019) <http://www.gtk.fi/geologia/luonnonvarat/geoenergia/>
- [37] Mustafa Omer, A. (2008). Ground-source heat pumps systems and applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 12(2), pp. 344-371. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032106001249>.
- [38] Juvonen, J. & Lapinlampi, T. Energiakaivo. (2013) Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa, Ympäristöministeriö, <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10138/40953>.
- [39] Renewable energy production of Finnish heat pumps. Report of the SPF-project (2014). in: VTT Technology 164, VTT,
- [40] Järventausta, P, Repo, S, Trygg, P, Rautiainen, A, Mutanen, A, Lummi, K, Supponen, A, Heljo, J, Sorri, J, Harsia, P, Honkiniemi, M, Kallioharju, K, Piikkilä, V, Luoma, J, Partanen, J, Honkapuro, S, Valtonen, P, Tuunanen, J & Belonogova, N 2015, Kysynnän jousto - Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkkoyhtiöille (DR pooli): Loppuraportti. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere.
- [41] Stănișteanu, C. (2017). Smart Thermal Grids – A Review, The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty,

- [42] Park, C., Lee, H., Hwang, Y. & Radermacher, R. (2015). Recent advances in vapor compression cycle technologies, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 60 pp. 118-134. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700715002480>.
- [43] Energia Teollisuus ry (2019). Vesa Korjula, Sähkötillastot, Asiantuntija, sähköposti
- [44] Clauß, J., Stinner, S., Solli, C., Lindberg, K.B., Madsen, H. & Georges, L. (2019). Evaluation Method for the Hourly Average CO<sub>2</sub>eq. Intensity of the Electricity Mix and Its Application to the Demand Response of Residential Heating, *Energies*, Vol. 12(7), pp. 1345.
- [45] International Carbon Action Partnership (ICAP) (2019). Emission Trading Worldwide, Status Report 2019.
- [46] European Environment Agency (EAA). CO<sub>2</sub> emission intensity, electricity generation, Table. Saatavilla: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz> [viitattu 23.12.2019]
- [47] International Energy Agency IEA (2017). Energy Policies of IEA Countries – Norway 2017 Review. saatavilla: <https://www.iea.org/reports/energy-policies-of-iea-countries-norway-2017-review>
- [48] Climate Transparency (2018). Brown to Green: The G20 Transition to a Low-Carbon Economy – 2018
- [49] Tilastokeskus. (2019). Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin, snt/kWh (Hinnat sisältävät sähköenergian, siirtomaksun ja verot.) PX-WEB tilastotietokannat 004. Viitattu 31.1.2020. Tilastotietokannat > Tietokanta: PX-Web Statfin > Energia-/Energian hinnat/004. saatavilla: <https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/>
- [50] International Carbon Action Partnership (ICAP), EU ETS Price data 2019. saatavilla: <https://icapcarbonaction.com/en/ets-prices> [viitattu 12.2.2020]
- [51] Jari Tanskanen (2020) Yle uutiset, Taloyhtiö vaihtoi kaukolämmön maalämpöön, säästää 24 000 euroa vuodessa ja yllättyi – asuntojen hinnat lähtivät merkittävään nousuun. saatavilla: <https://yle.fi/uutiset/3-11191581>
- [52] Ympäristöministeriö. (2018). Energiatodistusopas 2018 (s.14)
- [53] Toivio, V, Lettenmeier, M. (22.1.2018) Sitran elämäntapatestin laskentaperusteet D-mat oy,